

МИНИСТЕРСТВО ОБОРОНЫ СССР

ВОЕННО-ВОЗДУШНЫЕ СИЛЫ

В. Д. КАЗАКОВ, Ф. Г. МАШОШИН,
М. П. БОБНЕВ, Б. А. КАНАРЕЙКИН

РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ СРЕДСТВА СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПВО И ВВС

Под редакцией
кандидата технических наук В. Д. Казакова

*Утвержден
главнокомандующим ВВС
в качестве учебника
для подготовки офицеров запаса по профилям ВВС*

МОСКВА
ВОЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
1987

Рецензент: Руденко С. С. — кандидат технических наук

В учебнике рассматриваются методы и средства получения и передачи информации. Раскрывается физическая сущность процессов генерирования радиочастотных колебаний и их модуляции. Излагаются вопросы излучения и распространения электромагнитных волн. Дается характеристика антенн различного назначения и диапазонов. Освещаются приемные устройства РЭС, их параметры, структурные схемы и принципы действия.

Рассматриваются принципы радиолокации: методы определения координат и параметров движения объектов. Приводятся краткие сведения из теории оптимального обнаружения сигналов. Излагаются принципы построения и функционирования РЛС различного назначения, назначение радиоэлектронных средств навигации, связи и управления.

Освещаются принципы функционирования систем управления ПВО и ВВС и РЭС, входящих в их состав.

Приводятся краткие описания и тактико-технические характеристики некоторых зарубежных образцов РЭС.

При написании учебника использованы материалы открытой отечественной и зарубежной печати.

*Владимир Данилович Казаков
Федор Григорьевич Машошин
Матвей Петрович Бобнев
Борис Александрович Канарейкин*

РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ СРЕДСТВА СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПВО И ВВС

Редактор М. Н. Прусов
Редактор (литературный) О. Б. Григорьева
Технический редактор Н. Я. Богданова
Корректор Е. А. Борискина

Сдано в набор 11.10.86.

Подписано в печать 27.02.87. Г-12647

Формат 60×90/16. Печ. л. 13 1/2. Усл. печ. л. 13,5. Уч.-изд. л. 14,12. Усл. кр.-отт. 13,63.

Изд. № 7/2025

Бесплатно

Зак. 5034

ПРЕДИСЛОВИЕ

Учебник предназначен для подготовки офицеров запаса по профилям ВВС из числа студентов вузов. При его написании было учтено, что обучаемые не имеют надлежащих теоретических знаний в области радиотехники (генерирование и модуляция радиочастотных колебаний, излучение и распространение электромагнитных волн, антенно-фидерные устройства и прием радиосигналов) и незнакомы с принципами функционирования средств радиолокации, навигации, связи и управления. Учебник состоит из двух разделов. В I разделе излагаются элементарные основы радиотехники и принципы функционирования РЭС различного назначения. Освоение вопросов I раздела создает теоретическую базу для изучения материала II раздела — РЭС систем управления ПВО и ВВС.

При написании учебника авторы стремились прежде всего к истолкованию физической сущности явлений и процессов, обращая внимание на современные проблемы радиоэлектроники, на достижения в этой области. Насколько это было возможно, давались характеристики помехозащищенности РЭС, их уязвимости при воздействии организованных и неорганизованных помех.

По мнению авторов, изучение материала в предложенной последовательности обеспечивает возможность успешно усвоить принципы и особенности функционирования РЭС различного назначения, входящих в состав систем управления ПВО и ВВС.

Работа по написанию учебника распределялась следующим образом. Введение, гл. 1, 10 и заключение написаны В. Д. Казаковым, гл. 2, 3, 5, 8, 9, 11 и параграф 12.3 — Ф. Г. Машошиным, гл. 7 — М. П. Бобневым, параграфы 12.1, 12.2 и гл. 13 — Б. А. Канарейкиным, гл. 4 и 6 написаны совместно В. Д. Казаковым и Ф. Г. Машошиным.

Авторы выражают искреннюю признательность сотрудникам кафедр радиотехнического факультета РВВИУ им. Я. Алксниса и доценту, кандидату технических наук С. С. Руденко за тщательное рецензирование рукописи и замечания, которые были весьма полезны при доработке рукописи.

Преследуя агрессивные цели, страны — участницы блока НАТО, и прежде всего США, постоянно наращивают боевую мощь своих вооруженных сил, в том числе войск ПВО и ВВС. Большое внимание при этом уделяется дальнейшему совершенствованию и обновлению активных средств системы ПВО (истребительной авиации, зенитных ракетных и ствольных комплексов), летательных аппаратов ВВС, их вооружения, средств разведки и радиоэлектронной борьбы.

Противовоздушная оборона территории страны и важных объектов, прикрытие войск в районе боевых действий от воздушного нападения обеспечиваются путем уничтожения авиации и беспилотных средств. Процесс отражения воздушного нападения включает ряд последовательных действий, в том числе таких, как обнаружение и опознавание государственной принадлежности воздушных объектов, определение координат и параметров их движения, непрерывное сопровождение объектов противника и, наконец, их уничтожение. Для эффективного ведения борьбы с авиацией и беспилотными средствами в большом диапазоне дальностей, высот и скоростей их полета в системах ПВО капиталистических государств используются различные системы управления войсками и оружием, и прежде всего автоматизированные (с участием человека) и автоматические (без его участия).

Автоматизированные и автоматические системы управления авиацией и оружием широко применяются и в ВВС капиталистических государств. По мнению иностранных специалистов, данные системы позволяют повысить эффективность выполнения ВВС многих задач, в частности задач по наведению авиации на наземные цели и нанесению ударов по ним с применением управляемого и неуправляемого оружия, по ведению воздушной разведки и радиоэлектронной борьбы.

В состав современных систем управления войсками и оружием входят различные технические средства. Важнейшими из них являются радиоэлектронные средства (РЭС). С их помощью осуществляется получение, передача и прием информации, необходимой для функционирования систем управления. Существенные достоинства РЭС — большая дальность действия, высокое быстродействие, возможность использования в любое время суток и в любых метеоусловиях — делают их незаменимыми при решении различных задач по управлению войсками и оружием. При этом во

многих случаях эффективность функционирования систем управления ПВО и ВВС определяется эффективностью функционирования РЭС по их предназначению: обеспечение связи между отдельными звеньями системы управления, обнаружение наземных или воздушных объектов, наведение авиации на наземные или воздушные объекты и управляемых ракет классов «земля — воздух», «воздух — земля» и «воздух — воздух», навигация летательных аппаратов, разведка объектов и др.

Системы управления и РЭС, входящие в их состав, реально работают в условиях различного вида мешающих воздействий (помех). Не являются исключением и РЭС управления войсками и оружием ПВО и ВВС.

В результате воздействия помех эффективность функционирования РЭС и систем управления снижается. Степень снижения зависит от многих факторов, в частности от вида и интенсивности помех, способа создания помех, от устойчивости РЭС к воздействию помех. Воздействие помех на РЭС может затруднить или исключить прием и обнаружение передаваемых сообщений с помощью средств радиосвязи, обнаружение сигналов, отраженных от объектов, с помощью радиолокационных средств, снизить точность определения координат лоцируемых объектов и т. п.

При всем многообразии РЭС по решаемым задачам существуют общие закономерности в принципах передачи и получения информации, в принципах функционирования РЭС и структуре построения, общность методов измерений тех или иных параметров электромагнитных волн, используемых в РЭС в качестве переносчика информации, общность способов обеспечения заданных тактико-технических характеристик.

РАЗДЕЛ I

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ И ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

Глава 1. ПОЛУЧЕНИЕ И ПЕРЕДАЧА ИНФОРМАЦИИ

1.1. Радиоэлектронные средства получения и передачи информации. Радиосигнал — переносчик информации

Для управления силами и боевыми средствами ПВО и ВВС используются различные системы управления, в том числе автоматизированные и автоматические. Управление в принципе невозможно без непрерывного получения, передачи и обработки информации о противнике, своих силах и средствах, без взаимного обмена информацией между отдельными звеньями систем управления. Для получения и передачи информации применяются разнообразные по своим свойствам и возможностям технические средства. Одними из таких средств являются радиоэлектронные средства (РЭС). Широкое применение РЭС в системах управления ПВО и ВВС объясняется тем, что РЭС позволяют передавать речевые сообщения, команды управления, данные от ЭВМ, неподвижные и движущиеся изображения (средства связи, передачи команд и данных, телевизионные средства); обнаруживать и определять координаты, параметры движения, опознавать государственную принадлежность различных объектов (средства локации); управлять движением летательных аппаратов (средства навигации и управления); определять параметры принимаемых электромагнитных излучений (средства разведки).

РЭС, входящие в состав систем управления ПВО и ВВС, являются зачастую основными средствами получения и передачи информации. Так, например, отражение воздушного нападения противника предполагает последовательность действий по обнаружению воздушных целей и опознаванию их государственной принадлежности, определению координат (местоположения) и параметров их движения и, наконец, уничтожение авиации противника. Эффективность борьбы при этом будет в значительной степени зависеть от своевременности обнаружения и оповещения войск ПВО о начале нападения, от быстроты приведения их в готовность к отражению налета и непрерывности управления боевыми действиями. Решение подобных задач возможно только при широком применении РЭС, имеющих существенные преимущества по сравнению с другими средствами получения и передачи информации,

например со средствами визуального и акустического обнаружения, со средствами проводной телефонной связи.

Преимущества РЭС заключаются в том, что в качестве переносчика информации в них используются электромагнитные волны. Последние позволяют передавать и получать информацию с максимально возможной скоростью (скоростью света) и в широком диапазоне дальностей (от нескольких метров до нескольких тысяч километров). Возможность получения и передачи информации с помощью электромагнитных волн обуславливается тем, что их параметры (амплитуда, частота, фаза, поляризация) могут изменяться в широких пределах и принимать некоторую совокупность значений. По совокупности значений указанных параметров можно установить соответствующие значения передаваемого процесса (речевого сообщения, команд управления) или состояние объекта (местоположение, подвижное или неподвижное, изменение дальности до объекта во времени и т. д.). Передача и получение информации о значениях того или иного процесса, состоянии объекта осуществляется с помощью радиосигналов, представляющих собой электромагнитные колебания (излучения), параметры которых несут полезную информацию для ее получателя.

Спектр электромагнитных колебаний, используемых в РЭС, достаточно широк (табл. 1.1).

Таблица 1.1

Спектр электромагнитных колебаний

Волны	Диапазон волн	Частоты	Диапазон частот
Мириаметровые (сверхдлинные — СДВ)	100—10 км	Очень низкие частоты (ОНЧ)	3—30 кГц
Километровые (КМВ)	10—1 км	Низкие частоты (НЧ)	30—300 кГц
(длинные — ДВ)			
Гектометровые (ГМВ)	1000—100 м	Средние частоты (СЧ)	300—3000 кГц
(средние — СВ)			
Декаметровые (ДКВ)	100—10 м	Высокие частоты (ВЧ)	3—30 МГц
(короткие — КВ)			
Метровые (МВ)	10—1 м	Очень высокие частоты (ОВЧ)	30—300 МГц
Дециметровые (ДЦВ)	100—10 см	Ультравысокие частоты (УВЧ)	300—3000 МГц
Сантиметровые (СМВ)	10—1 см	Сверхвысокие частоты (СВЧ)	3—30 ГГц
Миллиметровые (ММВ)	10—1 мм	Крайне высокие частоты (КВЧ)	30—300 ГГц
Децимиллиметровые	1—0,1 мм	Гипервысокие частоты (ГВЧ)	300—3000 Гц
Световые	Менее 0,1 мм	Оптическое излучение	Более 3 ТГц

Выбор диапазона электромагнитных волн и частоты радиосигнала для конкретного РЭС определяется несколькими факторами: возможностью генерирования колебаний требуемой мощности,

возможностью управления параметрами этих колебаний, необходимой направленностью излучения и приема электромагнитных волн, особенностями распространения электромагнитных волн данного диапазона.

Следует заметить, что не всякое электромагнитное излучение является радиосигналом. Так, применительно к радиолокации радиосигналом является сигнал, отраженный от лоцируемого объекта или излучаемый им. Именно этот сигнал несет полезную информацию о лоцируемом объекте: о направлении на объект и дальности до него, его скорости движения, отражательной или излучательной способности. Сигнал, излучаемый РЛС (зондирующий сигнал), не является радиосигналом для нее (в частности, для оператора РЛС), так как не несет полезной информации об объекте. Вместе с тем этот же сигнал является радиосигналом для станций радиотехнической разведки противника (получателя информации о РЛС), так как по его параметрам могут быть определены назначение и тип РЛС, ее местоположение и принадлежность к той или иной системе управления.

Передача и получение полезной информации с помощью радиосигналов чаще всего связаны с преднамеренным (искусственным) изменением одного или нескольких его параметров во времени по определенному закону. Параметры радиосигналов могут изменяться во времени также под воздействием внешних факторов. Последнее особенно характерно при радиолокации объектов: параметры отраженных радиосигналов зависят не только от параметров сигналов, излучаемых РЛС, но и от характеристик лоцируемого объекта, от взаимного пространственного положения РЛС и объекта. Значительные изменения параметров отраженного сигнала (по сравнению с зондирующим) могут возникать при изменении во времени взаимного пространственного положения РЛС и объекта.

В основу передачи и получения информации с использованием радиосигналов в качестве переносчика информации положены различные физические явления: излучение, отражение, интерференция, дифракция, прямолинейность и постоянство скорости распространения, эффект Доплера и т. д. Краткая характеристика этих явлений будет дана в гл. 3. Здесь же в качестве примера отметим, что активная радиолокация — облучение движущихся и неподвижных лоцируемых объектов с приемом и обработкой отраженных от них сигналов — использует совокупность явлений, связанных с отражением электромагнитных волн: изменением интенсивности и поляризации отраженного сигнала, его временным запаздыванием относительно излученного сигнала и доплеровским приращением частоты отраженного сигнала.

Получение и передача информации с помощью электромагнитных волн предполагает в общем случае наличие источника их излучения, среды распространения и приемника электромагнитного излучения.

Рассмотрим кратко принцип функционирования РЭС, осуще-

ствляющего передачу информации из одного пункта в другой. Упрощенная структурная схема РЭС приведена на рис. 1.1.

Источником передаваемой информации может быть любой процесс (речевое сообщение, закон изменения высоты и скорости полета летательного аппарата во времени и т. д.). Соответствующим преобразователем (датчиком) информации (микрофон, датчик высоты и скорости полета) первичная информация преобразуется в электрические колебания. Последние используются для модуляции (изменения параметров) несущего колебания генера-

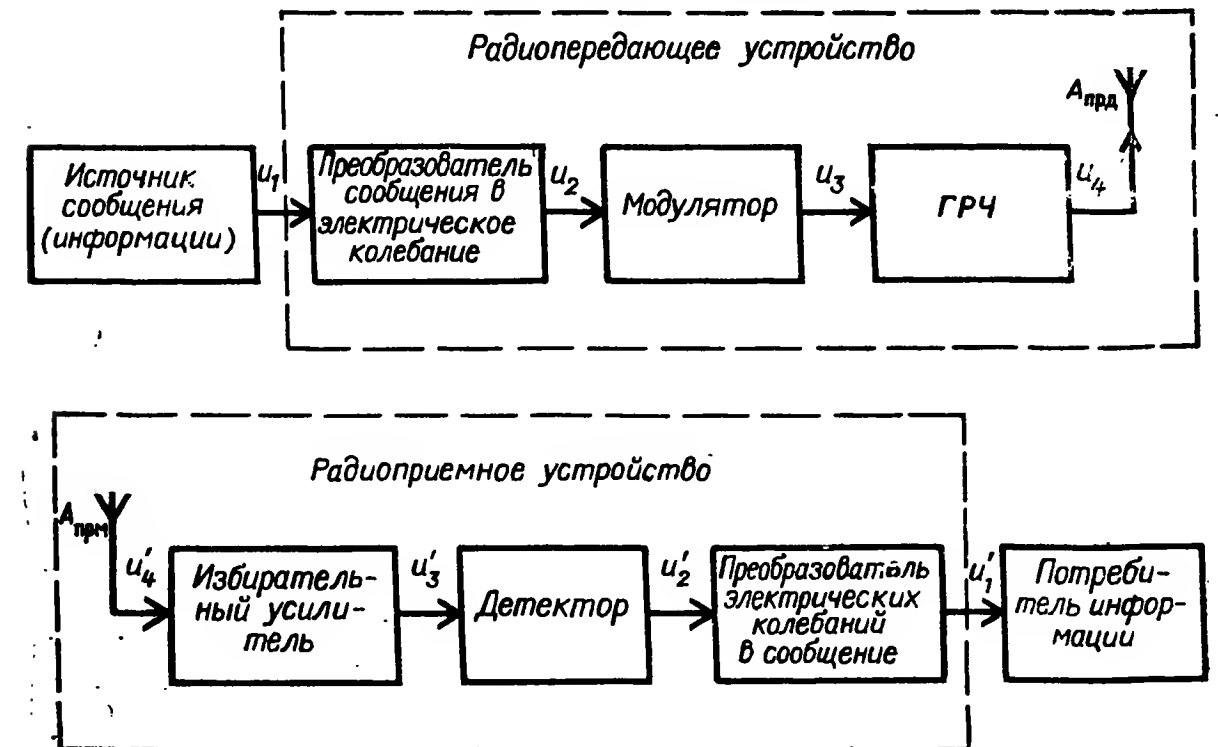


Рис. 1.1. Упрощенная структурная схема РЭС передачи информации

тора радиочастоты (ГРЧ). С помощью антенны $A_{прд}$ модулированное радиочастотное колебание создает в пространстве электромагнитные волны, несущие передаваемое сообщение. Электромагнитные волны (ЭМВ), пройдя среду распространения, воспринимаются антенной $A_{прм}$ радиоприемного устройства. В радиоприемном устройстве осуществляется преобразование электромагнитных волн в электрические колебания радиочастоты, их демодуляция (детектирование) и преобразование низкочастотных электрических колебаний в передаваемое сообщение. Электромагнитные волны, излучаемые антенной радиопередающего устройства, проходя различные среды, могут быть приняты в различных разнесенных точках пространства.

В последующих главах будут более подробно изложены вопросы излучения и распространения электромагнитных волн, рассмотрены передающие, приемные и антенно-фидерные устройства, принципы функционирования РЭС локации, связи, навигации и управления.

1.2. Классификация радиосигналов

Множество изменяемых параметров радиосигналов (амплитуда, частота, фаза, поляризация) и их возможных совместных сочетаний, множество законов изменения параметров во времени и пространстве позволяют получать радиосигналы, отличающиеся пространственно-временной структурой. На практике нашли применение сигналы различных видов.

В основу классификации радиосигналов могут быть положены различные признаки.

Одним из признаков классификации является классификация по виду модуляции генерируемых и излучаемых колебаний.

В общем случае радиосигнал, переносящий информацию, можно представить в виде колебания

$$s(t) = S_m(t) \cos [\omega_0 t + \varphi(t)] = S_m(t) \cos \psi(t), \quad (1.1)$$

где $S_m(t)$, ω_0 , $\varphi(t)$ — амплитуда, частота и фаза колебания.

Если S_m и φ — постоянные величины, то $s(t)$ представляет собой простое гармоническое («несущее») колебание, которое не содержит в себе никакой информации. Если S_m или φ (а следовательно, и ψ) преднамеренно изменяются для передачи информации, то колебание $s(t)$ становится модулированным. В зависимости от того, какой из двух параметров радиосигналов изменяется — амплитуда S_m или угол ψ — различают два основных вида модуляции: амплитудную или угловую. Угловая модуляция подразделяется на частотную и фазовую. Радиосигналы с амплитудной и угловой модуляцией будут рассмотрены более подробно в гл. 2.

В зависимости от вида модуляции радиосигналы подразделяются на сигналы с амплитудной, частотной или фазовой модуляцией.

Наряду с указанными видами модуляции применяется и так называемая поляризационная модуляция. Радиосигналы с поляризационной модуляцией представляют собой сигналы, у которых параметры поляризации излучаемых электромагнитных волн преднамеренно изменяются во времени. Поляризационная модуляция возможна при излучении электромагнитных волн с вращающейся поляризацией. Изменяющимся параметром поляризации может быть угол ориентации одной из полуосей эллипса поляризации электромагнитных волн или отношение малой полуоси эллипса поляризации к большей (коэффициент эллиптичности). Данный вид модуляции позволяет передавать на одной несущей частоте два независимых сообщения с одновременной модуляцией двух параметров поляризационной структуры. Кроме того, возможно сопряжение различных видов поляризационной модуляции с другими видами модуляции — амплитудной, частотной или фазовой.

Радиосигналы по их временному представлению могут быть детерминированными (неслучайными) и недетерминированными (случайными) или их комбинацией.

Детерминированный радиосигнал описывается точным математическим выражением (некоторой определенной функцией времени). Мгновенные значения таких сигналов могут быть определены для любого момента времени. Один из способов полного описания детерминированного сигнала — задание его точной функциональной зависимости от времени.

Детерминированные сигналы разделяются на периодические и непериодические. Для периодического сигнала выполняется условие $s(t) = s(t+T)$, где T — интервал периодичности (период повторения). Примером периодического детерминированного сигнала является гармоническое колебание. Непериодический детерминированный сигнал — сигнал, для которого не существует конечного отрезка времени T , удовлетворяющего условию $s(t) = s(t+T)$.

Случайные радиосигналы характерны тем, что их мгновенные значения точно определить нельзя. Описание таких сигналов основано на представлениях о случайных величинах и случайных процессах. К случайным сигналам относится, например, последовательность радиоимпульсов, отраженных от подвижного объекта, на входе приемника. Амплитуды и фазы высокочастотного заполнения этих импульсов флуктуируют из-за изменения взаимного пространственного положения РЛС и лоцируемого объекта и из-за изменений условий распространения электромагнитных волн.

1.3. Математические методы описания детерминированных сигналов

Любой сложный периодический сигнал может быть представлен с помощью ряда Фурье как сумма простых гармонических колебаний:

$$s(t) = 0,5a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos k\Omega_1 t + b_k \sin k\Omega_1 t), \quad (1.2)$$

где Ω_1 — угловая частота первичной гармоники; $0,5 a_0$ — постоянная составляющая (среднее значение); a_k и b_k — амплитуды косинусоидальных и синусоидальных членов разложения $s(t)$.

Коэффициенты ряда Фурье определяются выражениями:

$$a_k = \frac{2}{T} \int_0^T s(t) \cos k\Omega_1 t dt; \quad (1.3)$$

$$b_k = \frac{2}{T} \int_0^T s(t) \sin k\Omega_1 t dt; \quad (1.4)$$

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_0^T s(t) dt. \quad (1.5)$$

Ряд (1.2) может быть представлен также в виде

$$s(t) = 0,5A_0 + \sum_{k=1}^{\infty} A_k \cos(k\Omega_1 t + \varphi_k), \quad (1.6)$$

где $0,5A_0 = 0,5a_0$; $A_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}$; $\varphi_k = -\arctg(b_k/a_k)$,

k -й член этого ряда $A_k \cos(k\Omega_1 t + \varphi_k)$ является k -й гармоникой сигнала.

Совокупность простых гармонических колебаний, на которые может быть разложен сложный периодический сигнал, называется его спектром. Распределение амплитуд гармоник по частоте называют амплитудно-частотным спектром (АЧС) или сокращенно амплитудным спектром, а распределение их начальных фаз по частоте — фазово-частотным спектром (ФЧС) или фазовым спектром. АЧС и ФЧС обозначаются соответственно $A_k(\Omega_k)$ и $\varphi_k(\Omega_k)$.

В случае комплексной формы представления синусоидального колебания ряд (1.6) записывается в виде

$$s(t) = 0,5 \sum_{k=-\infty}^{k=\infty} A_k e^{jk\Omega_1 t}, \quad (1.7)$$

где

$$A_k = \frac{2}{T} \int_0^T s(t) e^{-jk\Omega_1 t} dt. \quad (1.8)$$

Спектр периодической последовательности видеоимпульсов $u(t)$ прямоугольной формы (рис. 1.2, а) определяется выражением

$$\dot{U}_k(\Omega_k) = \frac{2U\tau_u}{T_n} \frac{\sin(k\Omega_n\tau_u/2)}{k\Omega_n\tau_u/2}. \quad (1.9)$$

АЧС и ФЧС этой последовательности изображены на рис. 1.2, б и 1.2, в. Расстояние по шкале между соседними гармониками спектра равно частоте повторения импульсов F_n ($F_n = 1/T_n$).

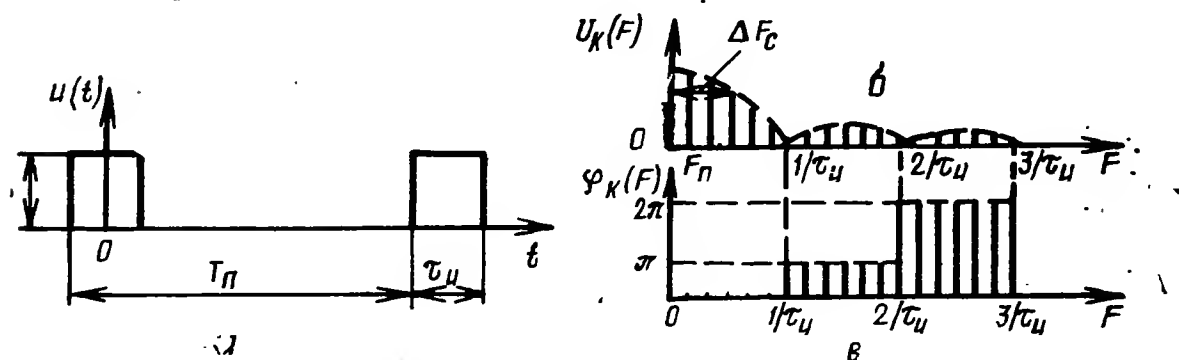


Рис. 1.2. Периодическая последовательность прямоугольных видеоимпульсов (а), их амплитудный (б) и фазовый (в) спектры

Непериодический сигнал можно рассматривать как предельный случай периодического при $T_n \rightarrow \infty$ и $\Omega_n \rightarrow 0$. Выражения для спектра и сигнала:

$$\dot{S}(\Omega) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) e^{-j\Omega t} dt; \quad (1.10)$$

$$s(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \dot{S}(\Omega) e^{j\Omega t} d\Omega. \quad (1.11)$$

$\dot{S}(\Omega) = S(\Omega) e^{-j\varphi(\Omega)}$ называется спектральной функцией (спектральной плотностью) сигнала, модуль $S(\Omega) = |\dot{S}(\Omega)|$ — его спектром, а $\varphi(\Omega)$ — фазой спектральной функции.

Спектр одиночного видеоимпульса $u(t)$ прямоугольной формы (рис. 1.3, а) описывается выражением

$$\dot{S}(\Omega) = 2U\tau_u \frac{\sin(\Omega\tau_u/2)}{\Omega\tau_u/2}. \quad (1.12)$$

Спектральная плотность амплитуд и фазовый спектр этого сигнала изображены на рис. 1.3, б, в. Спектр непериодического сигнала является сплошным (непрерывным). Непрерывный и дискрет-

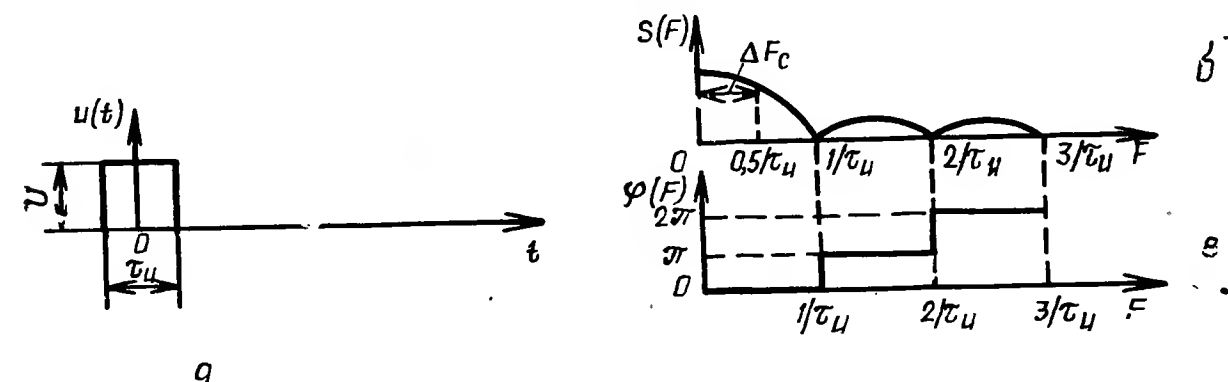


Рис. 1.3. Одиночный прямоугольный видеоимпульс (а), его амплитудный (б) и фазовый (в) спектры

ный спектры не совпадают по размерности. Линии дискретного спектра имеют размерность амплитуды сигнала. Непрерывный спектр указывает распределение амплитуд по всему спектру и имеет размерность плотности амплитуд сигнала.

Важным параметром сигнала является ширина его спектра. Если спектр занимает ограниченную полосу частот от F_{\min} до F_{\max} , то ширина спектра

$$\Delta F_c = F_{\max} - F_{\min}. \quad (1.13)$$

Если спектр сигнала является неограниченным, то при определении ширины пренебрегают гармониками, амплитуды которых малы и не превышают определенного (заданного) уровня. Наибо-

лее часто пользуются уровнем 0,707 по амплитуде или 0,5 по мощности от максимального значения. Так, например, ширина спектра видеоимпульсов прямоугольной формы (рис. 1.2, а) на уровне 0,707 по амплитуде находится из выражения $\Delta F_c \approx 1/2\tau_k$.

1.4. Математические методы описания случайных процессов

Для описания случайных процессов используют методы теории вероятностей. В общем случае полной характеристикой случайного процесса является его многомерная плотность вероятностей.

Для стационарных гауссовских процессов одномерная плотность вероятностей определяется выражением

$$w(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(u-m)^2}{2\sigma^2}}, \quad (1.14)$$

где $m = \overline{u(t)} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt$ — постоянная составляющая (математическое ожидание) случайного процесса, а

$\sigma^2 = \overline{(u-m)^2} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T (u-m)^2 dt$ — мощность переменной составляющей (дисперсия) случайного процесса.

Для описания гауссовских процессов достаточными характеристиками являются m , σ^2 и корреляционная функция процесса $R(\tau)$.

Функция $R(\tau)$ характеризует статистическую связь между двумя значениями случайного процесса со сдвигом на τ :

$$R(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T [u(t) - m][u(t + \tau) - m] dt. \quad (1.15)$$

При $\tau=0$ корреляционная функция равна дисперсии. Нормированная корреляционная функция $r(\tau) = R(\tau)/\sigma^2$ называется коэффициентом корреляции.

Одной из характеристик случайного сигнала является его спектральная плотность мощности, связанная с корреляционной функцией $R(\tau)$ обобщенным преобразованием Фурье:

$$G(\Omega) = \int_{-\infty}^{\infty} R(\tau) e^{-j\Omega\tau} d\tau; \quad (1.16)$$

$$R(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G(\Omega) e^{j\Omega\tau} d\Omega. \quad (1.17)$$

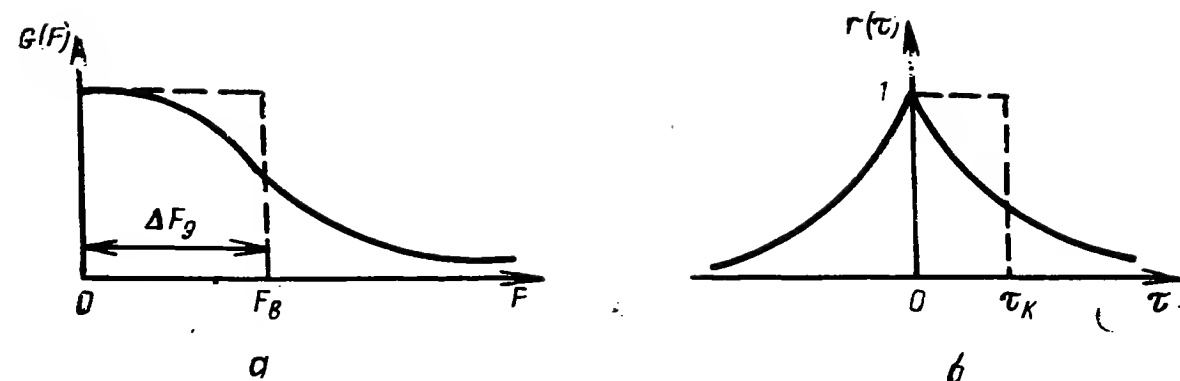


Рис. 1.4. Спектральная плотность (а) и нормированная корреляционная функция (б) случайного процесса

Функции $G(\Omega)$ и $r(\tau)$ экспоненциально коррелированного процесса изображены на рис. 1.4, а, б.

Спектр случайного процесса является сплошным. Случайные процессы характеризуются также эффективной шириной спектра ΔF_g и интервалом корреляции τ_k :

$$\Delta F_g = \frac{\int_0^{\infty} G(F) dF}{G(0)}; \quad \tau_k = \int_0^{\infty} |r(\tau)| d\tau. \quad (1.18)$$

Произведение $\Delta F_g \tau_k$ — величина постоянная. Чем меньше τ_k , тем шире спектр.

Для случайных процессов с постоянной спектральной плотностью N_0 и бесконечной полосой частот мощность бесконечна, а корреляционная функция является дельта-функцией $R(\tau) = N_0 \delta(\tau)/2$. Такой процесс имеет бесконечную дисперсию, является некоррелированным и называется «белым шумом». У случайного процесса с постоянной спектральной плотностью G_n в ограниченной полосе частот ΔF_n мощность P_n является конечной и ее можно определить выражением

$$P_n = G_n \Delta F_n. \quad (1.19)$$

Мощность помехи с другим распределением спектральной плотности определяется выражением

$$P_n = \int_0^{\infty} G_n(F) dF.$$

Глава 2. ПЕРЕДАЮЩИЕ УСТРОЙСТВА

2.1. Основные параметры передающих устройств

Передающее устройство — техническое устройство, состоящее из передатчика и антенны и предназначенное для формирования и излучения радиочастотного сигнала. Передатчик предназначен для

генерирования электрических колебаний несущей (рабочей) частоты, модуляции этих колебаний и передачи их в антенну для излучения в пространство. Основными параметрами передатчиков являются диапазон рабочих частот, нестабильность частоты, коэффициент полезного действия, выходная мощность, вид модуляции и др.

Диапазоном рабочих частот называется диапазон возможных частот настройки передатчика, в пределах которого обеспечивается его нормальная работа. Он определяется назначением РЭС и характеризуется минимальным f_{\min} и максимальным f_{\max} значениями частот диапазона. Отношение $k_d = f_{\max}/f_{\min}$ называется коэффициентом перекрытия диапазона. Диапазон частот может быть непрерывным или дискретным. В первом случае передатчик настраивается на любую частоту диапазона, во втором — только на фиксированные частоты. Количество рабочих частот определяется шириной спектра излучаемого сигнала, нестабильностью частоты передатчика, гетеродина приемника и др. Множество значений частот, следующих через заданные интервалы, образуют сетку рабочих частот. Разность между соседними дискретными значениями частот называется шагом сетки рабочих частот.

Нестабильность частоты — любые изменения несущей частоты относительно заданного (номинального) значения. Различают абсолютную и относительную нестабильность частоты передатчика. Абсолютная нестабильность $\Delta f = |f_{\text{ном}} - f|$ определяется отклонением частоты колебания f на выходе передатчика за определенный промежуток времени относительно номинального значения $f_{\text{ном}}$. Действительное значение частоты f обозначается часто символом f_c . Отношение $\delta_f = \Delta f / f_{\text{ном}}$ называется относительной нестабильностью. Нестабильность частоты обусловлена непостоянством питающих напряжений, изменением сопротивления нагрузки, колебаниями теплового режима и др. Нестабильность частоты передатчика вызывает необходимость расширения полосы пропускания приемника, что уменьшает его чувствительность и дальность действия РЭС. Нормы допустимой относительной нестабильности устанавливаются в зависимости от назначения РЭС и колеблются в пределах $1 \cdot 10^{-4} - 1 \cdot 10^{-10}$.

Под выходной мощностью $P_{\text{прд}}$ понимают мощность, отдаваемую выходным каскадом передатчика в антенну. Мощность передатчика определяет дальность действия РЭС.

Коэффициент полезного действия (к. п. д.) $\eta_{\text{прд}}$ — отношение выходной мощности к мощности, потребляемой от источников питания, часто измеряется в процентах.

Передатчики могут работать в импульсном и непрерывном режимах генерации электрических колебаний. В импульсных передатчиках генерируются последовательности радиоимпульсов. В передатчиках с непрерывным излучением вырабатываются непрерывные радиосигналы. По виду модуляции несущего колебания различают передатчики с амплитудной (АМ), импульсной (ИМ), частотной (ЧМ) и фазовой (ФМ) модуляцией.

При АМ изменяемым параметром несущего колебания является амплитуда. ИМ — модуляция несущей последовательностью импульсов. ЧМ — модуляция, при которой отклонения частоты модулированного сигнала изменяются пропорционально мгновенным значениям модулирующего сигнала. При ФМ фаза несущего колебания изменяется пропорционально мгновенным значениям модулирующего сигнала.

2.2. Основные структурные схемы передатчиков

Структурная схема передающего устройства определяется назначением РЭС, видом излучаемых сигналов, диапазоном рабочих частот. В простейшем передатчике (рис. 2.1) генерирование ко-

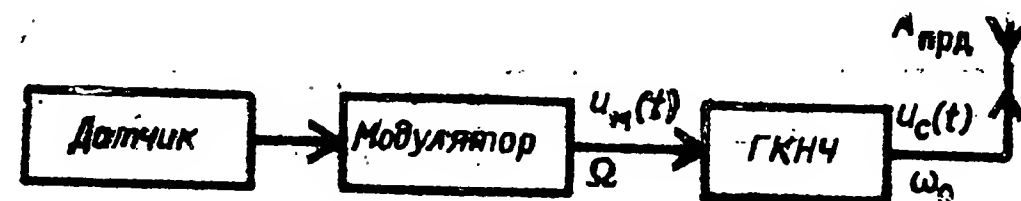


Рис. 2.1. Структурная схема передатчика с мощным генератором самовозбуждения

лебаний несущей частоты f_0 , их модуляция и усиление полученных сигналов осуществляется в одном каскаде — генераторе колебаний несущей частоты (ГКНЧ). В таком передатчике можно реализовать любой вид модуляции. Однако передатчики, построенные по такой схеме, обладают большой нестабильностью частоты ($\delta_f = 1 \cdot 10^{-3}$). Это объясняется непрерывным изменением режима ГКНЧ вследствие воздействия на него модулирующего сигнала и влияния антенны.

Меньшую нестабильность несущей частоты ($\delta_f = 1 \cdot 10^{-4}$) имеют передатчики, выполненные по схеме, изображенной на рис. 2.2.

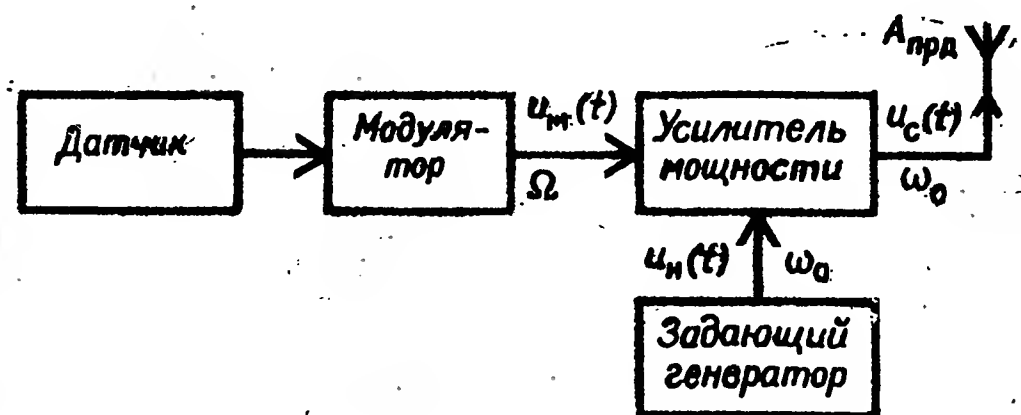


Рис. 2.2. Структурная схема передатчика с задающим генератором

Здесь управление параметрами несущего колебания, генерируемого задающим генератором (ЗГ), и усиление полученных сигналов осуществляется в выходном каскаде — усилителе мощности (УМ). Для уменьшения δ_f используются промежуточные (буферные) каскады, устанавливаемые между ЗГ и УМ.

Повышенные требования к δ_f приводят к необходимости построения передатчиков с использованием сложных многокаскадных схем. При этом ЗГ работают на частотах, отличных от f_0 . Если эти частоты ниже f_0 , то между ЗГ и УМ включают каскады умножителей частоты (рис. 2.3). Для стабилизации частоты ЗГ часто применяются кварцевые резонаторы, позволяющие снизить δ_f до $1 \cdot 10^{-5} \div 1 \cdot 10^{-6}$. При термостатировании кварцевых резонаторов может быть обеспечена нестабильность $\delta_f = 1 \cdot 10^{-7} \div 1 \cdot 10^{-9}$.

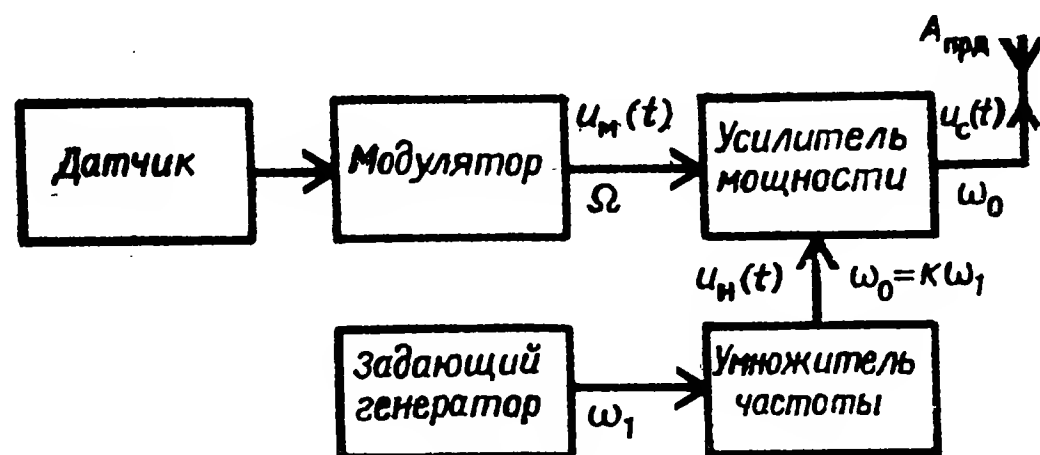


Рис. 2.3. Структурная схема передатчика с умножителем частоты

Генерирование гармонических колебаний осуществляется в ЗГ (автогенераторах), работающих в режиме самовозбуждения. Принцип действия автогенераторов основан на преобразовании энергии постоянного тока в энергию переменного (синусоидального) тока радиочастоты. Автогенератор представляет собой усилитель с цепью положительной обратной связи. Для существования в автогенераторе незатухающих колебаний необходимо выполнить баланс фаз и баланс амплитуд. В частном случае это означает, что напряжение обратной связи на входе усилителя должно быть противофазным по отношению к напряжению выходного сигнала и достаточным, чтобы компенсировать затухание энергии в колебательной системе. При соблюдении этих условий колебания обычно возникают самопроизвольно из-за шумового напряжения, причем частота генерируемых колебаний определяется параметрами колебательной системы и приближенно равна резонансной частоте контура.

В усилителях мощности нагрузкой является колебательный контур, настроенный на частоту усиливаемых колебаний. Для получения большой выходной мощности выходной каскад работает в нелинейном режиме.

Умножители частоты также работают в нелинейном режиме. Нагрузкой этих каскадов является колебательный контур, настроенный на частоту выбранной гармонической составляющей тока. При этом другие гармоники тока, включая и первую, подавляются.

В качестве активных элементов автогенераторов, усилителей и умножителей частоты могут использоваться транзисторы и электронные лампы. В диапазоне СВЧ электронные лампы с управляющими сетками находят ограниченное применение, потому что время пролета электронов между электродами становится соизмеримым с периодом колебаний на входе. Вследствие этого коэффициент усиления электронных ламп падает. Для генерирования и усиления колебаний в этом диапазоне используются генераторы СВЧ со скоростной модуляцией электронного потока: клистроны, магнетроны, лампы бегущей волны (ЛБВ), лампы обратной волны (ЛОВ) и др. Эти приборы работают на принципе управления скоростью электронов.

Клистроны в зависимости от особенностей работы подразделяются на пролетные и отражательные. В пролетном клистроне поток электронов, формируемый электронным прожектором (рис. 2.4, а), проходит узкий зазор между стенками первого (входного) резонатора, в котором возбуждаются колебания внешним сигналом. Пролетая зазор этого резонатора, электроны подвергаются скоростной модуляции, в результате чего в пролетном пространстве группируются их сгустки. Сгустки электронов за счет электростатической индукции наводят во втором контуре колебания той же частоты. Энергия этих колебаний элементом связи отводится в нагрузку. При наличии положительной обратной связи между выходным и входным резонаторами система будет работать как генератор с самовозбуждением. Пролетные клистроны могут работать как в импульсном, так и в непрерывном режиме и использоваться в радиолокационных, радионавигационных и радиосвязных устройствах. Их выходная мощность составляет десятки киловатт в непрерывном режиме и десятки мегаватт в импульсном режиме в диапазоне от 0,2 до 40 ГГц. Коэффициент усиления 60—70 дБ, $\eta = 30 \div 40\%$. Основными недостатками пролетных клистронов являются ограниченная полоса усиливаемых частот и малый коэффициент перестройки по частоте ($k_f = 1,01$).

Особенностью отражательного клистрона (рис. 2.4, б) является то, что он содержит лишь один резонатор, а вместо коллектора — отражатель, находящийся под отрицательным потенциалом. Электроны, вылетающие из катода, проходят сетки резонатора, модулируются по скорости и движутся сначала к отражателю, затем под влиянием его тормозящего поля — в обратном направлении, группируются в сгустки и попадают в тормозящее поле резонатора. Здесь энергия электронов передается электромагнитным колебаниям, отводимым в нагрузку. Отражательные клистроны имеют $\eta = 2 \div 3\%$, выходную мощность несколько десятков милливатт.

Используются в диапазоне СМВ и ММВ в качестве гетеродинов приемников и измерительных генераторов.

ЛБВ предназначены для усиления и генерирования колебаний в диапазоне ДЦВ, СМВ и ММВ. Принцип действия ЛБВ (рис. 2.5) основан на непрерывном взаимодействии электронов с ЭМВ, бегущей в одном направлении с электронами вдоль замедляющей системы (спирали). В процессе этого взаимодействия группируются сгустки электронов, которые тормозятся электрическим полем волны и отдают ей часть своей энергии. Различают ЛБВ с продольными электрическими (ЛБВ типа О) и поперечными магнитными (ЛБВ типа М) полями. ЛБВ обладают возможностью усиления сигналов в широкой полосе частот (до 2 ГГц), $\eta = 20 \div 40\%$, коэффициент усиления — 40—80 дБ, выходная мощность — от единиц ватт до нескольких киловатт в непрерывном режиме и нескольких сотен киловатт в импульсном режиме.

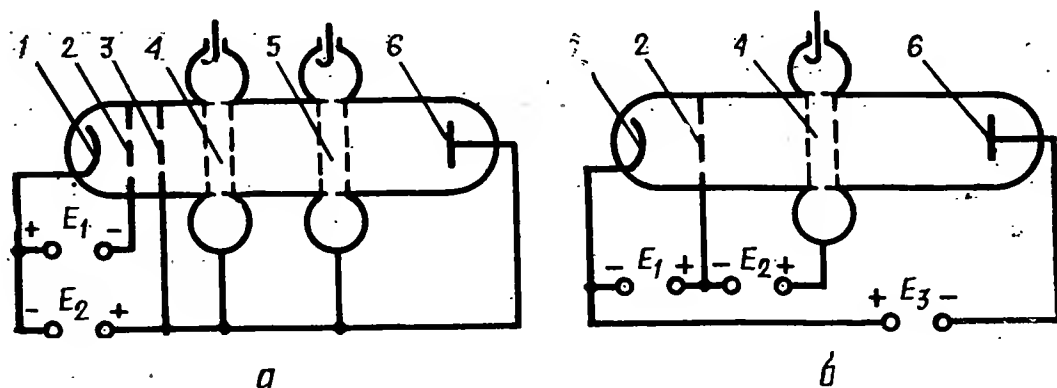


Рис. 2.4. Пролетный (а) и отражательный (б) клистроны:

1 — катод; 2 — управляющая сетка; 3 — ускоряющий электрод; 4 и 5 — объемные резонаторы; 6 — коллектор

Для генерирования колебаний в СВЧ-диапазоне широко используются лампы обратной волны типа О и М (ЛОВ-О и ЛОВ-М). Принцип их действия аналогичен принципу действия ЛБВ-О и ЛБВ-М. Отличие состоит в том, что сконцентрированные в узкий пучок электроны и электромагнитные волны движутся в противоположных направлениях. ЛОВ могут работать в широком диапазоне частот ($k_f = 1,5 \div 2$), имеют высокий к. п. д. (до 40%), большую выходную мощность (несколько киловатт в непрерывном и несколько сотен киловатт в импульсном режиме). ЛОВ-М нашли широкое применение в качестве мощных СВЧ-автогенераторов, передатчиков станций помех и др. ЛОВ-О также используются в качестве автогенераторов, имеют малый к. п. д. (единицы процентов), находят применение в качестве перестраиваемых гетеродинов широкополосных приемников.

Для генерирования мощных колебаний в диапазонах СМВ и ММВ применяются также многорезонаторные магнетроны. Принцип действия магнетрона основан на формировании сгустков элек-

тронов и их взаимодействии с тормозящим электрическим полем резонаторов. В импульсном режиме они позволяют получить мощность в импульсе до 10 МВт, а в непрерывном — до 10 кВт. Достоинство магнетрона — высокий к. п. д. (55%), а недостаток — высокая нестабильность частоты и невозможность электронной перестройки частоты. Магнетронные генераторы используются в передатчиках РЛС и радионавигационных станций. Перспективным является использование однорезонаторных магнетронов (митронов), которые имеют $k_f = 1,5 \div 3$, хорошую линейность модуляционной характеристики и высокий к. п. д. (30—40%). Для генерирования и усиления сигналов применяются также устройства на твердотельных приборах СВЧ: лавинно-пролетные диоды (ЛПД), диоды Ганна, параметрические диоды, полевые и биполярные транзисторы.

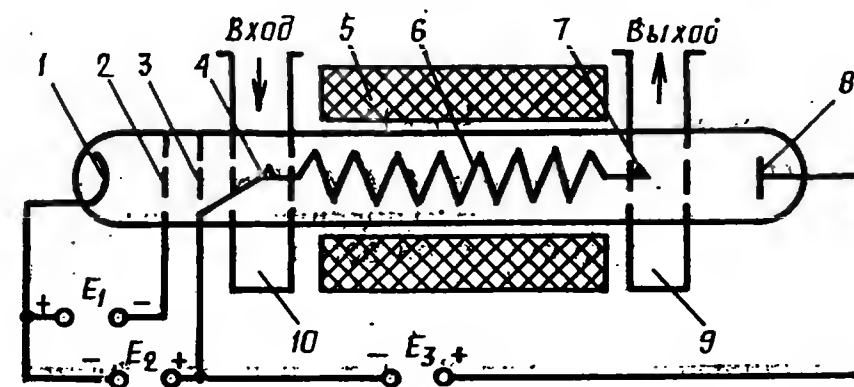


Рис. 2.5. Лампа бегущей волны:

1 — катод; 2 — управляющая сетка; 3 — ускоряющий электрод; 4 и 7 — входной и выходной элементы связи; 5 — фокусирующая катушка; 6 — замедляющая система (спираль); 8 — коллектор; 9 и 10 — входной и выходной волноводы

Генерирование и усиление колебаний в оптическом диапазоне осуществляется с помощью квантовых генераторов (лазеров и др.). Принцип их действия основан на эффекте выделения энергии возбужденными молекулами и атомами вещества при переходе их на более низкий энергетический уровень. Управление выделяющейся энергией в режиме усиления осуществляется входным сигналом.

2.3. Управление колебаниями в передающих устройствах

В передатчиках кроме генерирования радиочастотного гармонического колебания несущей частоты f_0 осуществляется его модуляция по тому или иному параметру управляющим сигналом (сообщением).

Несущее радиочастотное (РЧ) колебание описывается выражением

$$u_H = U_{mH} \cos(\omega_0 t + \varphi_0). \quad (2.1)$$

Колебание характеризуется амплитудой $U_{mн}$, частотой ω_0 и начальной фазой φ_0 . Частота и фаза любого колебания связаны друг с другом соотношениями:

$$\omega(t) = \frac{d\varphi(t)}{dt}; \quad \varphi(t) = \int_0^t \omega(t) dt + \varphi_0. \quad (2.2)$$

При модуляции в соответствии с модулирующим сигналом $u_m(t)$ подвергается изменению один из трех параметров сигнала (2.1): амплитуда, частота или фаза. В зависимости от того, какая величина изменяется, различают АМ-, ИМ-, ФМ- и ЧМ-радиосигналы. Рассмотрим основные характеристики и параметры радиосигналов.

АМ-радиосигналы. При АМ воздействие модулирующего сигнала $u_m(t)$ на колебание (2.1) приводит к пропорциональному изменению его амплитуды. Общее выражение АМ-радиосигнала можно представить в виде

$$u_{AM} = U_m(t) \cos(\omega_0 t + \varphi_0) = U_{mн} [1 + m_c(t)] \cos(\omega_0 t + \varphi_0). \quad (2.3)$$

Здесь $U_m(t) = U_{mн} + k u_m(t)$ — амплитуда модулированного колебания; $m_c(t) = k u_m(t) / U_{mн}$ — мгновенный коэффициент амплитудной модуляции (повторяет закон изменения модулирующего колебания).

Для неискаженной передачи $|m_c(t)| \leq 1$.

При гармоническом модулирующем сигнале, изображенном на рис. 2.6, а,

$$u_m(t) = U_{mм} \cos \Omega t, \quad \Omega \ll \omega_0 \quad (2.4)$$

выражение (2.3) упрощается и принимает вид

$$u_{AM} = U_{mн} (1 + m \cos \Omega t) \cos(\omega_0 t + \varphi_0). \quad (2.5)$$

Здесь $m = |m_c(t)|_{\max} = k U_{mм} / U_{mн}$ — коэффициент АМ.

Из выражения (2.5) и соответствующего ему рис. 2.6, б видно, что при АМ-амплитуда радиосигнала изменяется с частотой Ω от $U_{m\max} = U_{mн}(1+m)$ до $U_{m\min} = U_{mн}(1-m)$, причем

$$m = \frac{U_{m\max} - U_{m\min}}{U_{m\max} + U_{m\min}} = \frac{\Delta U_m}{U_{mн}}. \quad (2.6)$$

Величину m часто измеряют в процентах. После тригонометрических преобразований выражения (2.5), считая, что $\varphi_0 = 0$, получим

$$u_{AM} = U_{mн} \cos \omega_0 t + 0,5mU_{mн} \cos(\omega_0 + \Omega)t + 0,5mU_{mн} \cos(\omega_0 - \Omega)t. \quad (2.7)$$

Из этого выражения видно, что модулированное колебание состоит из трех гармонических колебаний с частотами ω_0 , $\omega_0 + \Omega$ и $\omega_0 - \Omega$. Колебание с частотой $\omega_0 + \Omega$ называется верхним боковым, а колебание с частотой $\omega_0 - \Omega$ — нижним боковым. Амплитуды боковых составляющих равны $0,5mU_{mн}$. Амплитудно-частотные спек-

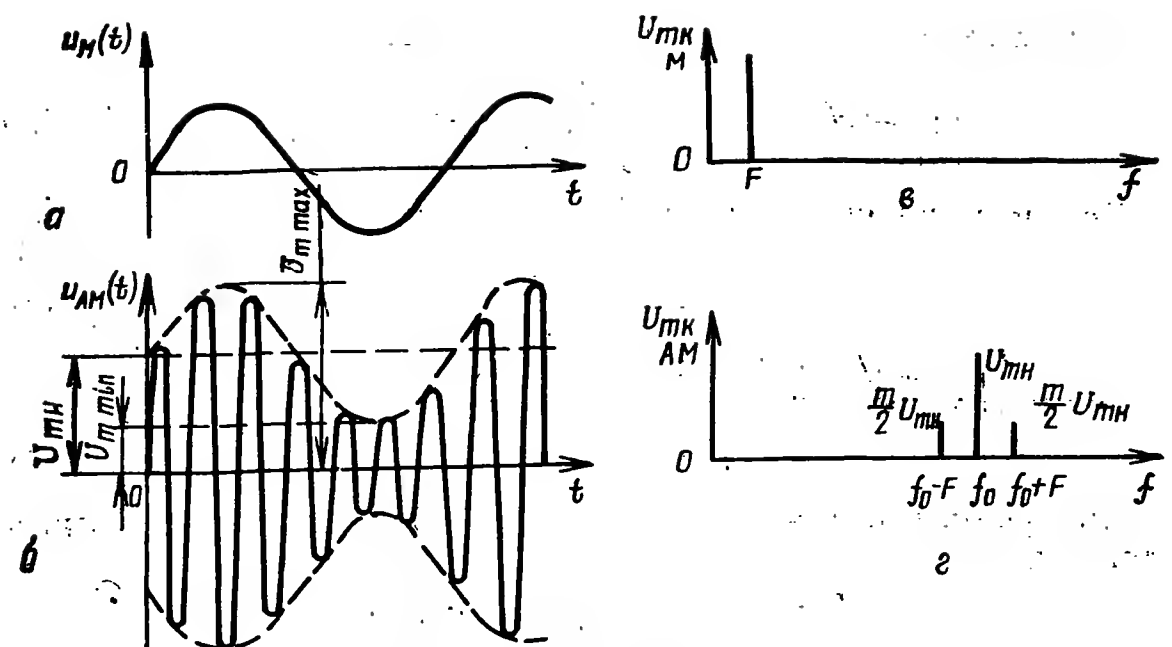


Рис. 2.6. Модулирующее гармоническое колебание (а) и его спектр (б); модулированное АМ-колебание (в) и его спектр (г)

ры колебаний (2.4) и (2.7) показаны на рис. 2.6, в, г. Ширина спектра радиосигнала $\Delta\omega_c = 2\Omega$.

При модуляции сложным сигналом модулированное колебание имеет спектр (рис. 2.7, б), который также состоит из колебаний несущей частоты и столько пар боковых составляющих, сколько гармоник содержит модулирующий сигнал (рис. 2.7, а), причем

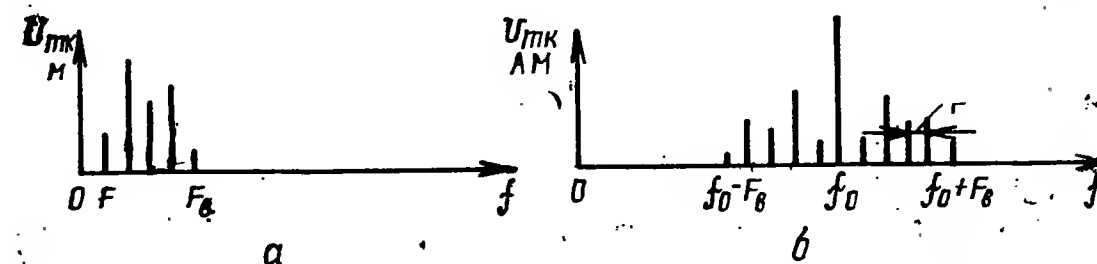


Рис. 2.7. Спектры сложного периодического модулирующего сигнала (а) и АМ-колебания (б)

правая боковая полоса воспроизводит спектр модулирующего сигнала, перенесенный на частоту f_0 , а левая представляет его зеркальное отображение. Ширина спектра АМ-сигнала равна $\Delta f_c = 2F_v$, где F_v — верхняя частота спектра модулирующего сигнала.

ЧМ-радиосигналы. При ЧМ приращение частоты несущего колебания изменяется пропорционально мгновенному значению модулирующего сигнала $u_m(t)$, т. е.

$$\omega(t) = \omega_0 + k_{чм} u_m(t), \quad (2.8)$$

где $k_{чм}$ — коэффициент ЧМ, показывающий, насколько изменится приращение частоты при изменении амплитуды модулирующего сигнала на 1 В.

Общее выражение ЧМ-радиосигнала имеет вид

$$u_{\text{ЧМ}} = U_m \cos \left[\omega_0 t + k_{\text{ЧМ}} \int_0^t u_m(t) dt + \varphi_0 \right]. \quad (2.9)$$

При модуляции сигналом (2.4) выражение (2.9) представляется в виде (рис. 2.8, б)

$$u_{\text{ЧМ}} = U_m \cos [\omega_0 t + \beta_{\text{ЧМ}} \sin \Omega t + \varphi_0], \quad (2.10)$$

где $\beta_{\text{ЧМ}} = k_{\text{ЧМ}} U_{m\text{м}} / \Omega$ — индекс частотной модуляции.

Максимальное приращение частоты называется девиацией.

$$\Delta \omega_{\text{дев}} = k_{\text{ЧМ}} U_{m\text{м}}. \quad (2.11)$$

При $\beta_{\text{ЧМ}} \ll 1$ и $\varphi_0 = 0$ выражение (2.10) упрощается и принимает вид

$$u_{\text{ЧМ}} = U_m \cos \omega_0 t + 0,5 \beta_{\text{ЧМ}} U_m \cos (\omega_0 + \Omega) t - 0,5 \beta_{\text{ЧМ}} U_m \cos (\omega_0 - \Omega) t. \quad (2.12)$$

Сравнив выражения (2.12) и (2.7), можно сделать вывод, что АЧС сигналов не отличаются. Однако ФЧС сигналов различны.

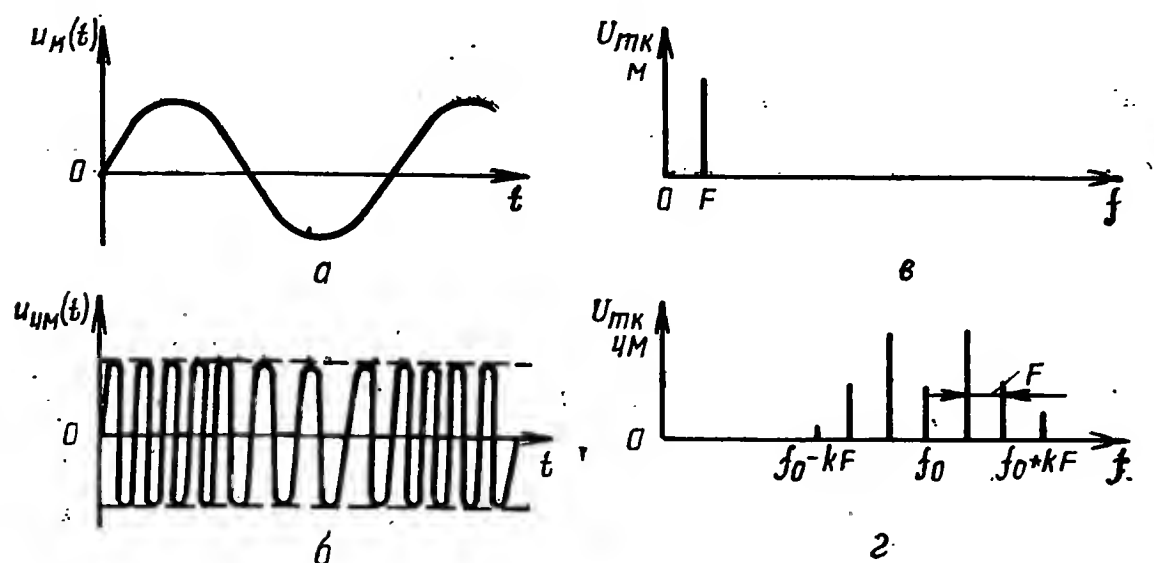


Рис. 2.8. Модулирующее гармоническое колебание (а) и его спектр (б); модулированное ЧМ-колебание (в) и его спектр (г)

При $\beta_{\text{ЧМ}} \gg 1$ выражение (2.10) можно представить в виде ряда Фурье:

$$u_{\text{ЧМ}} = U_m \left\{ J_0(\beta) \cos \omega_0 t + \sum_{k=1}^{\infty} J_k(\beta) [\cos (\omega_0 + k\Omega) t + (-1)^k \cos (\omega_0 - k\Omega) t] \right\}, \quad (2.13)$$

где $J_k(\beta)$ — функция Бесселя первого рода с аргументом β .

Из выражения (2.13) видно, что спектр сигнала является дискретным и неограниченным. Он имеет две широкие полосы (рис. 2.8, г), состоящие из линий, отстоящих друг от друга на величину Ω . Ширину спектра ЧМ радиосигнала в общем случае можно определить по формуле

$$\Delta \omega_c = 2(\Delta \omega_{\text{дев}} + \Omega_{\text{в}}), \quad (2.14)$$

где $\Omega_{\text{в}}$ — верхняя частота спектра модулирующего сигнала.

Радиосигналы с ФМ. При ФМ дополнительное приращение фазы колебания (2.1) изменяется по закону $u_m(t)$, т. е.

$$\varphi(t) = \omega_0 t + k_{\text{ФМ}} u_m(t) + \varphi_0. \quad (2.15)$$

Здесь $k_{\text{ФМ}}$ — коэффициент ФМ, показывающий, насколько изменится фаза сигнала при изменении амплитуды модулирующего сигнала на 1 В.

При модуляции сигналом $u_m(t) = U_{m\text{м}} \sin \Omega t$ модулированный ФМ-радиосигнал имеет вид

$$u_{\text{ФМ}} = U_m \cos (\omega_0 t + \beta_{\text{ФМ}} \sin \Omega t + \varphi_0). \quad (2.16)$$

Здесь коэффициент $\beta_{\text{ФМ}} = k_{\text{ФМ}} U_{m\text{м}}$ (максимальное приращение фазы сигнала) называется индексом ФМ.

Мгновенная частота ФМ-сигнала изменяется по закону

$$\omega(t) = \omega_0 + \beta_{\text{ФМ}} \Omega \cos \Omega t.$$

Сравнив выражения (2.16) и (2.10), можно прийти к выводу, что при $\beta_{\text{ФМ}} = \beta_{\text{ЧМ}}$ спектры их одинаковы. При ЧМ и ФМ индексы модуляции пропорциональны $U_{m\text{м}}$. Однако индекс модуляции при ФМ не зависит от частоты модулирующего сигнала, а при ЧМ — обратно пропорционален ей. Это различие приводит к тому, что при модуляции сложным сигналом спектры ФМ и ЧМ сигналов будут различными.

АМ, как правило, реализуется в выходном каскаде передатчика, ЧМ — в задающем генераторе. Изменение частоты достигается изменением реактивного сопротивления его колебательной системы. Обычно модулирующий сигнал воздействует на активный элемент (вариакп и др.), подключаемый параллельно контуру.

При ФМ ЗГ вырабатывает колебание стабильной частоты, фаза которого изменяется под действием модулирующего сигнала в одном из каскадов передатчика. В приборах СВЧ-диапазона АМ, ФМ и ЧМ реализуются путем подачи модулирующего сигнала на соответствующие электроды.

Глава 3. ИЗЛУЧЕНИЕ И РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

3.1. Основные свойства электромагнитных волн

Процесс возбуждения электромагнитных волн (ЭМВ) движущимися зарядами называется излучением. Способностью излучать ЭМВ обладают передающие антенны и тела, температура которых выше абсолютного нуля.

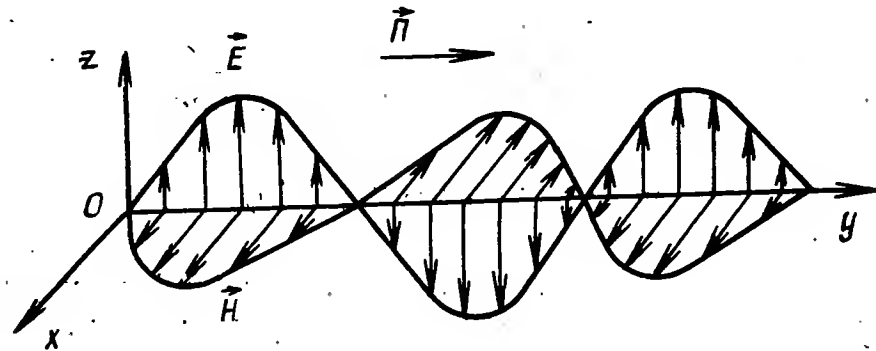


Рис. 3.1. Взаимное расположение векторов \vec{E} и \vec{H} вдоль направления распространения ЭМВ

В каждой точке свободного пространства векторы напряженности электрического \vec{E} и магнитного \vec{H} полей взаимно перпендикулярны, изменяются в фазе и лежат в плоскости, перпендикулярной направлению распространения ЭМВ (рис. 3.1). Направление распространения ЭМВ и плотность потока переносимой энергии в любой точке пространства определяются вектором Пойтинга

$$\vec{P} = \vec{E} \times \vec{H}.$$

Распространение ЭМВ в вакууме и в однородных средах происходит прямолинейно с конечной скоростью. Скорость распространения ЭМВ в вакууме равна скорости света ($c_0 = 3 \cdot 10^8$ м/с). В средах с относительными диэлектрической ϵ_r и магнитной μ_r проницаемостями она равна

$$c = c_0 / \sqrt{\epsilon_r \mu_r}.$$

Расстояние, проходимое ЭМВ за период колебания T , называется длиной волны λ ($\lambda = cT$). Длина волны в метрах и частота в мегагерцах связаны соотношением

$$\lambda = 300/f. \quad (3.1)$$

В зависимости от длины волны различают радиоволны ($\lambda = 1 \cdot 10^{-4} - 1 \cdot 10^5$ м) и световые ($\lambda < 0,1$ мм) волны. Классификация радиоволн по диапазонам приведена в табл. 1.1. Световые (оптические) волны делятся на инфракрасные ($\lambda = 0,75 \div 100$ мкм), видимый свет ($\lambda = 0,4 \div 0,75$ мкм) и ультрафиолетовые ($\lambda = 0,1 \div 0,4$ мкм).

При относительном перемещении источника излучения и приемника с радиальной скоростью V_p частота принимаемых ЭМВ отличается от частоты излучаемых ЭМВ на величину

$$F_d \approx f_0 \frac{V_p}{c} = \frac{V_p}{\lambda}, \quad (3.2)$$

где F_d — доплеровское приращение частоты.

Линия, вдоль которой распространяется ЭМВ, называется лучом. Поверхность, проходящая через точки пространства с одинаковой фазой и перпендикулярная вектору \vec{P} в каждой точке, называется фронтом волны.

В зависимости от фронта волны различают поперечные, плоские, цилиндрические и сферические ЭМВ. Поперечной называется ЭМВ, у которой векторы \vec{E} и \vec{H} лежат в плоскости, перпендикулярной вектору \vec{P} . Плоская ЭМВ представляет собой поперечную ЭМВ, поверхности равных фаз которой представляют собой параллельные плоскости, перпендикулярные вектору \vec{P} .

Сферическая ЭМВ — поперечная ЭМВ, поверхности равных фаз которой представляют собой концентрические сферы.

Цилиндрическая ЭМВ — поперечная ЭМВ, поверхности равных фаз которой представляют собой концентрические цилиндры, касательные к которым перпендикулярны вектору \vec{P} .

Важной характеристикой ЭМВ является ее поляризация, определяющая закон изменения вектора \vec{E} в данной точке за период колебаний. Различают плоскополяризованные ЭМВ и ЭМВ с линейной, круговой и эллиптической поляризацией.

Плоскополяризованной называется ЭМВ, векторы \vec{E} и \vec{P} которой параллельны одной фиксированной плоскости. У линейно-поляризованной ЭМВ вектор \vec{E} параллелен одной фиксированной линии. Линейно-поляризованная ЭМВ, вектор \vec{E} которой лежит в плоскости падения, называется вертикально поляризованной. Под плоскостью падения понимают плоскость, проходящую через нормаль к поверхности раздела двух сред в точке падения и через падающий луч. Если вектор \vec{E} перпендикулярен плоскости падения, то ЭМВ называется горизонтально поляризованной.

В ЭМВ с круговой поляризацией проекция конца вектора \vec{E} на плоскость, перпендикулярную вектору \vec{P} , представляет окружность. У ЭМВ с эллиптической поляризацией проекция представляет эллипс.

В зависимости от направления вращения конца вектора \vec{E} относительно вектора \vec{P} различают правополяризованные и левопо-

ляризованные ЭМВ. Если для наблюдателя, смотрящего в направлении распространения ЭМВ, вращение вектора \vec{E} происходит по ходу часовой стрелки, то ЭМВ называется правополяризованной.

У левополяризованной волны конец вектора \vec{E} вращается против часовой стрелки. ЭМВ с круговой и эллиптической поляризацией называются ЭМВ с вращающейся поляризацией.

На больших расстояниях от источника кривизна фронта сферической волны в пределах площади приемной антенны мала, и ее можно считать плоской.

Распространение ЭМВ в свободном пространстве сопровождается убыванием плотности потока энергии с увеличением расстояния. У сферической волны плотность потока энергии обратно пропорциональна квадрату расстояния, у плоских ЭМВ она не зависит от расстояния.

Мгновенные значения E и H полей в любой точке пространства описываются волновыми уравнениями. Если известен закон изменения напряженности электрического поля в точке A $e_A = E_A \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$, то в точку B , удаленную на расстояние D , ЭМВ приходит с запаздыванием на время $\tau_z = \tau_D = D/c$ и будет иметь вид

$$e_B = E_B \cos[\omega_0(t - \tau_D) + \varphi_0]. \quad (3.3)$$

Полезная информация, переносимая ЭМВ, может быть заключена в законе изменения одного из ее параметров, например амплитуды, частоты, времени запаздывания, поляризации или одновременно нескольких параметров.

При распространении ЭМВ в неоднородных средах возможны явления отражения, поглощения, дифракции и интерференции.

Отражение ЭМВ от границы раздела двух сред объясняется переизлучением падающей электромагнитной энергии. В зависимости от соотношения величин неровности и λ отражение может быть зеркальным и диффузным (рассеянным). При рассеянном отражении происходит преобразование распространяющихся в одном направлении ЭМВ в ЭМВ, распространяющихся в различных направлениях. Зеркальное отражение описывается законами геометрической оптики и происходит, если средняя высота неровностей меньше $\lambda/16$.

Явление отражения (рассеяния) ЭМВ положено в основу радиолокационного обнаружения объектов. Объекты, линейные размеры которых малы по сравнению с λ , слабо отражают ЭМВ. В этом случае они огибают препятствие. Явление огибания ЭМВ препятствий называется дифракцией. При поглощении происходит уменьшение энергии ЭМВ вследствие частичного перехода ее в тепловую энергию в результате взаимодействия со средой. Явление искривления траектории луча в неоднородной среде называется рефракцией.

Вследствие прихода в место приема нескольких ЭМВ с меняющимися во времени друг относительно друга фазами возникают интерференционные замирания.

3.2. Характеристика сред распространения ЭМВ

Любая среда распространения ЭМВ характеризуется относительными диэлектрической ϵ_r , магнитной μ_r проницаемостями и удельными электрической g и магнитной проводимостями, а также характером зависимости этих величин от свойств распространения ЭМВ, прежде всего от амплитуды и частоты.

Если параметры среды не зависят от величины \vec{E} и \vec{H} , среда называется линейной, в противном случае среда называется нелинейной. Если ϵ_r и μ_r являются функцией частоты, среда называется диспергирующей, в противном случае — недиспергирующей. Если свойства среды одинаковы во всех направлениях, среда называется изотропной, в противном случае — анизотропной.

Среды могут сильно отличаться по величине проводимости g . Идеальным диэлектриком называется среда, проводимость которой равна нулю. В идеальном диэлектрике под действием ЭМВ возникают токи смещения, в идеальном проводнике — ток проводимости.

Параметры реальных сред распространения отличаются от параметров идеально проводящих сред и идеальных диэлектриков. Реальные среды характеризуются комплексной диэлектрической проницаемостью

$$\epsilon_r = \epsilon_r - j60g\lambda. \quad (3.4)$$

Величина $k = g\lambda/\epsilon_r$ служит критерием для деления сред на проводники и диэлектрики в зависимости от λ . Среда считается проводником, если $k > 1$, диэлектриком, если $k < 1$, и полупроводником, если $k = 1$.

В большинстве практических случаев средой распространения ЭМВ является атмосфера Земли. Наибольшее влияние на распространение ЭМВ оказывают ее тропосфера и ионосфера. Тропосфера простирается до высот 10—15 км. С увеличением высоты температура и влажность воздуха падают. Поэтому показатель преломления уменьшается с высотой. При резких изменениях метеорологических условий показатель преломления может изменяться в значительных пределах. В тропосфере имеются также местные неоднородности, вызываемые турбулентным движением воздуха. Эти явления сильно влияют на распространение ЭМВ. Ионизированная часть атмосферы, расположенная на расстоянии 50—2000 км от поверхности Земли, называется ионосферой. Ионосфера представляет собой совокупность ионизированных слоев, образующихся под действием солнечных и космических излучений. Слои обозначают буквами D , E и F . Слой D является самым нижним слоем ионосферы, появляется только днем, ночью этот слой

исчезает. Слой *D* расположен над поверхностью Земли на высоте 50—90 км. Слой *E* лежит на высотах 90—150 км, а слой *F* удален от Земли на расстояние более 150 км.

Наибольшую концентрацию зарядов имеет слой *F*. Область между тропосферой и ионосферой называется стратосферой. Она обладает постоянными электрическими свойствами.

3.3. Особенности распространения электромагнитных волн различных диапазонов

Вследствие отражения ЭМВ от ионосферы и огибания ими земной поверхности в точку приема могут приходить ионосферная и земная волны (рис. 3.2). Земная ЭМВ, распространяющаяся вдоль

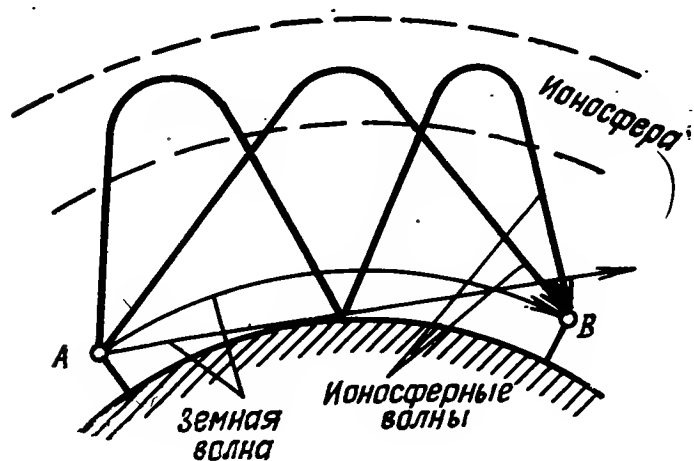


Рис. 3.2. Радиосвязь с помощью земной и ионосферной волн

земной поверхности, включает прямую волну, волну, отраженную от Земли, и поверхностную волну. Прямая волна распространяется непосредственно от источника к месту приема. Отраженная ЭМВ распространяется после отражения от поверхности раздела двух сред или от неоднородности среды. Поверхностная ЭМВ образуется в результате огибания препятствий.

На распространение земных ЭМВ существенное влияние оказывают поглощение и дифракция.

Ионосферные волны, многократно отражаясь от ионосферы и поверхности Земли, могут распространяться на большие расстояния и огибать земной шар.

Рассмотрим особенности распространения ЭМВ различных диапазонов.

Мириаметровые волны и КМВ (СДВ и ДВ) распространяются как земной, так и ионосферной волной. Для этих волн токи проводимости для всех видов земной поверхности преобладают над токами смещения. Поэтому при распространении земной волны происходит небольшое проникновение ее энергии в глубь Земли. Вследствие небольших потерь энергии эти волны могут распространяться земной волной на дальности до 3000 км. Ионосферная волна появляется в точке приема на расстояниях свыше 300—400 км, причем на расстоянии свыше 3000 км связь устанавлива-

ется с использованием ионосферной волны. Волны указанного диапазона мало поглощаются при прохождении в толщу суши и моря. Условия распространения являются достаточно стабильными. По этой причине мириаметровые волны и КМВ используются в системах дальней радионавигации и линиях дальней радиосвязи (в частности, для связи с подводными лодками в погруженном положении). Недостатком РЭС этих диапазонов является невозможность их использования для передачи широкополосных сообщений.

ГМВ могут распространяться земными и ионосферными волнами. Днем эти волны распространяются, как земные волны. Однако они испытывают значительное поглощение в полупроводящей поверхности Земли. Дальность распространения волн днем составляет порядка 1000 км. Ночью дальность распространения ГМВ возрастает, так как их поглощение в ионосфере резко уменьшается. При одновременном приеме земной и ионосферной волн, претерпевших различное число отражений, возникают интерференционные замирания. ГМВ используются в радионавигации, телефонной и телеграфной радиосвязи.

ДКВ распространяются в основном ионосферной волной, так как земная волна затухает на расстояниях нескольких десятков километров. Распространение происходит в результате многократных отражений падающей волны от ионосферы (слои *E*, *F*) и Земли. Поскольку потери при распространении невелики, ДКВ распространяются на большие расстояния (вплоть до полного огибания Земли). Практически всегда существует такое значение λ , при котором потери в ионосфере являются минимальными. Это позволяет применять для дальней связи маломощные передатчики. Для радиосвязи на ДКВ характерным является наличие мертвой зоны (зоны молчания), в которой прием сигналов невозможен. Она начинается с расстояния, где земная волна уже не обеспечивает связь, и оканчивается в ближайшей точке прихода на Землю ионосферной волны. Для ДКВ в большей степени, чем для ГМВ, характерно замирание сигналов. Помимо дальней радиосвязи ДКВ используются также в загоризонтной радиолокации.

УКВ распространяются как прямой волной, так и путем рассеянного отражения от неоднородностей в тропосфере и ионосфере. По своим свойствам и характеру распространения УКВ ближе к световым волнам. Однако за счет рефракции УКВ обладают способностью огибать препятствия. При этом дальность прямой видимости увеличивается на 15% и рассчитывается по формуле

$$D_{\text{пр}} = 4,12 (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}), \quad (3.5)$$

где $D_{\text{пр}}$ — расстояние в километрах; h_1 и h_2 — высоты подъема передающей и приемной антенн, м.

МВ могут распространяться на большие расстояния в результате рассеяния от ионосферы. ДЦВ практически не испытывают молекулярного поглощения и поглощения в гидрометеорах. Поглощение в гидрометеорах заметно на волнах короче 3—5 см. ДЦВ

и СМВ проходят через ионосферу, не отражаясь от нее и не рассеиваясь в ней. На распространение ДЦВ и СМВ влияют различные неровности на земной поверхности, которые вызывают отражение и частичное поглощение энергии. Эти волны широко используются в радиолокации, ближней радионавигации и радиосвязи.

Распространение ММВ и децимиллиметровых волн не зависит от ионосферы. Значительное влияние оказывают на них гидрометеоры (дождь, туман, снег и т. п.). Они испытывают также сильное молекулярное поглощение в газах. Могут применяться для ближней радиолокации, радионавигации и для радиосвязи в тропосфере.

Распространение ЭМВ оптического диапазона происходит по законам геометрической оптики. Условия распространения ЭМВ сильно зависят от наличия гидрометеоров. Сильное поглощение этих волн вызывает дымка и мгла, пылевые бури. При отсутствии осадков использование оптических волн может осуществляться только в пределах «окон» прозрачности и могут применяться в РЭС локации, навигации, связи и управления.

Глава 4. АНТЕННО-ФИДЕРНЫЕ УСТРОЙСТВА

4.1. Линии передачи электромагнитных колебаний

Для передачи высокочастотной электромагнитной энергии от передатчика к антенне и от антенны к приемнику, а также для соединения других высокочастотных узлов в РЭС применяются двухпроводные длинные линии и волноводы.

Двухпроводная длинная линия (рис. 4.1, а) представляет собой систему из двух параллельных проводников, длина которой сравнима или больше длины волны возбужденных в ней колебаний. Распространение энергии в длинной линии (ДЛ) носит волновой характер и происходит со скоростью, меньшей скорости распространения электромагнитной энергии в свободном пространстве. Конструкция длинных линий различна. На рис. 4.1, а изображена длинная линия, состоящая из двух одинаковых параллельных проводников, расположенных на расстоянии d . Для снижения потерь на излучение расстояние d должно быть существенно меньшим длины электромагнитной волны, распространяющейся вдоль линии. В связи с указанным ограничением эти линии используются на длинах волн $\lambda \geq 1$ м. Для передачи высокочастотных колебаний в дециметровом диапазоне применяются коаксиальные линии (КЛ), состоящие из двух соосно расположенных проводников — внутреннего и внешнего (рис. 4.1, б). Внешний проводник КЛ выполнен в виде полого цилиндра. По оси цилиндра расположен внутренний проводник. Изоляция между проводами достигается путем заполнения коаксиальной линии твердым диэлектриком. В отличие от открытой двухпроводной линии в коаксиальной

линии отсутствуют электромагнитные излучения благодаря экранирующему действию внешнего проводника.

Основные достоинства длинных линий заключаются в их конструктивной простоте и широкополосности, т. е. способности работать в широком диапазоне частот. Этим объясняется их применение в диапазонах метровых и дециметровых волн. При переходе к сантиметровым и более коротким волнам возрастают потери в проводниках линии за счет поверхностного эффекта и по-

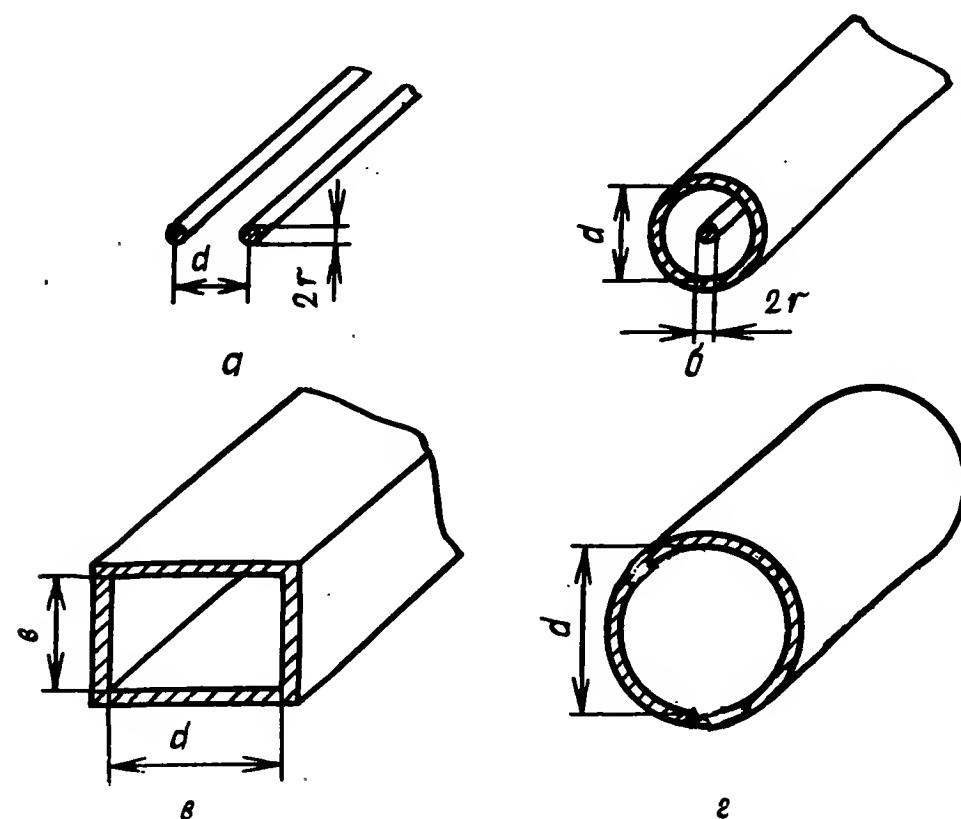


Рис. 4.1. Линии передачи электромагнитных колебаний: двухпроводная линия (а); коаксиальная линия (б); волноводы прямоугольного (в) и круглого сечения (г)

терь в диэлектрике, окружающем провода линии. Ввиду этого для передачи электромагнитной энергии в сантиметровом и миллиметровом диапазонах волн применяются волноводы.

Волноводы представляют собой полые или заполненные диэлектриком металлические трубы с прямоугольным или круглым поперечным сечением (рис. 4.1, в, г). Электромагнитные колебания в волноводе распространяются за счет многократного отражения от его боковых стенок. Электромагнитные излучения в окружающее пространство отсутствуют. Большая проводящая поверхность, по которой протекают высокочастотные токи, способствует уменьшению потерь передаваемой энергии на нагревание стенок. Волноводы изготовляют из медных труб. Для лучшей проводимости внутренние поверхности покрывают золотом или серебром.

Передача электромагнитной энергии по волноводу возможна лишь в тех случаях, когда длина волны λ возбуждающего источника электромагнитных колебаний меньше некоторого критического значения $\lambda_{кр}$. Критическое значение $\lambda_{кр}$ определяется размерами поперечного сечения волновода. Для волноводов прямоугольного и круглого сечения (рис. 4.1, *в, г*) $\lambda_{кр}=2a$ и $\lambda_{кр}=1,7d$ соответственно.

В качестве линий передач РЭС находят применение также и волноводы других видов, например полосковый (ленточный) волновод. Он состоит из параллельных металлических полос, разделенных диэлектриком. Электромагнитные колебания в волноводе распространяются в пространстве между полосами. Наличие диэлектрика приводит к некоторым потерям передаваемой энергии и вместе с этим к уменьшению опасности электрического пробоя. Эти волноводы используются для передачи колебаний большой мощности в коротковолновой части сантиметрового диапазона и в миллиметровом диапазоне.

4.2. Классификация, основные характеристики антенн

Антенна — это устройство, предназначенное для излучения (передающая антенна) и приема (приемная антенна) ЭМВ. Одна и та же антенна может выполнять функции передающей и приемной (свойство обратимости).

Передающая антенна осуществляет преобразование энергии высокочастотных колебаний, поступающих от передатчика РЭС, в ЭМВ, распространяющиеся от антенны в окружающее пространство.

Приемная антенна улавливает энергию ЭМВ источников излучения и преобразует их в энергию высокочастотных колебаний, поступающих на вход приемника.

Антенны классифицируют по нескольким признакам. По назначению антенны делятся на передающие, приемные и приемопередающие, а в зависимости от области применения — на радиолокационные, радиосвязные, радионавигационные, телевизионные и др., по диапазону рабочих частот — на антенны метрических волн, КМВ, ДКВ и УКВ (табл. 1.1). По принципу действия и конструкции антенны подразделяют на проволочные, щелевые, акустического типа (волноводные и рупорные), оптического типа (зеркальные, линзовые), спиральные, поверхностных волн, а по геометрии излучающих элементов — на линейные антенны и антенны с излучающим раскрытием (апертурой). По распределению в пространстве излучаемой энергии ЭМВ антенны делятся на направленные и ненаправленные. Направленность излучения (приема) антенн позволяет определить направление на источники первичного или вторичного излучения ЭМВ (задачи радиолокации, радионавигации, радиоуправления); способствует повышению помехозащищенности РЭС; позволяет сконцентрировать излучаемую

энергию в узкой области пространства и при равной мощности передатчика получить большую дальность действия РЭС.

Антенны подразделяют также по способу управления положением диаграммы направленности антенны (с механическим, электромеханическим и электрическим сканированием), по месту установки (наземные, подземные, корабельные, самолетные). Возможна классификация антенн и по другим признакам.

К основным характеристикам антенн относятся: коэффициент полезного действия (КПД), коэффициент направленного действия (КНД) антенны, коэффициент усиления антенны, уровень боковых лепестков, эффективная площадь антенны, диапазон рабочих частот, поляризационные характеристики и др.

КПД антенны — отношение мощности сигнала, излучаемой антенной, к мощности сигнала, подводимой к ней. Характеризует эффективность преобразования антенной подводимой к ней ВЧ-энергии в энергию ЭМВ.

КНД антенны $D(\varphi, \Theta)$ называется отношением квадрата напряженности поля $E^2(\varphi, \Theta)$, создаваемого в данном направлении, к среднему значению квадрата напряженности поля по всем направлениям. КНД является количественным показателем направленности излучения (приема) антенны и характеризует степень концентрации энергии, излучаемой антенной, в данном направлении. В ТТД РЭС обычно приводят величину КНД в направлении максимального излучения. Величина КНД остронаправленных антенн может составлять несколько тысяч.

Коэффициент усиления $G(\varphi, \Theta)$ — отношение мощности на входе эталонной антенны к мощности, подводимой к реальной антенне, при условии, что обе антенны создают в данном направлении на одинаковом расстоянии равные значения напряженности поля или равные значения плотности потока мощности. КНД и коэффициент усиления связаны соотношением $G(\varphi, \Theta) = \eta D(\varphi, \Theta)$.

Нормированное значение коэффициента усиления (или КНД) антенны относительно его максимального значения называют нормированной диаграммой направленности антенны по мощности $F^2(\varphi, \Theta) = G(\varphi, \Theta)/G_m$. В этом выражении $F(\varphi, \Theta)$ — нормированная диаграмма направленности антенны по напряженности электромагнитного поля (ДНА).

В пространстве ДНА по мощности представляет собой объемную фигуру, ограниченную замкнутой поверхностью, радиус-вектор каждой точки которой равен $F^2(\varphi, \Theta)$. В общем случае эта поверхность представляет собой несколько объемных лепестков. Лепесток, в пределах которого излучение максимально, называется главным, лепесток, противоположный главному, — задним, а остальные лепестки называются боковыми. Форма ДНА может быть тороидальной, игольчатой, веерной, косекансной (рис. 4.2, *а — г*). Изобразить пространственную ДНА довольно сложно, поэтому строят ее сечения какими-либо плоскостями. Для этих целей часто используются две взаимно перпендикулярные плоскости, ли-

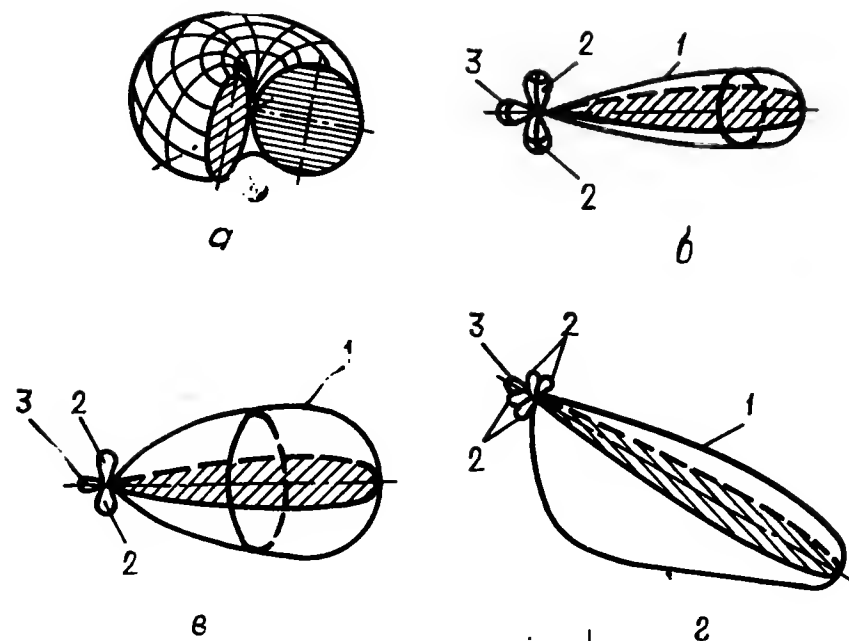


Рис. 4.2. Диаграмма направленности антенн: торoidalная (а); игольчатая (б); веерная (в); коаксиальная (г); 1 — главный (основной) лепесток; 2 — боковые лепестки; 3 — задний лепесток

нии пересечения которых совпадают с максимумом главного лепестка ДНА. Плоские ДНА изображаются в полярной или прямоугольной системе координат (рис. 4.3, а, б).

Шириной ДНА называют угол, образованный двумя лучами, в пределах которого коэффициент усиления антенны не меньше некоторого значения. Величину этого угла обозначают Θ_{τ} , где τ — величина уровня. Часто этот уровень выбирается равным 0,5.

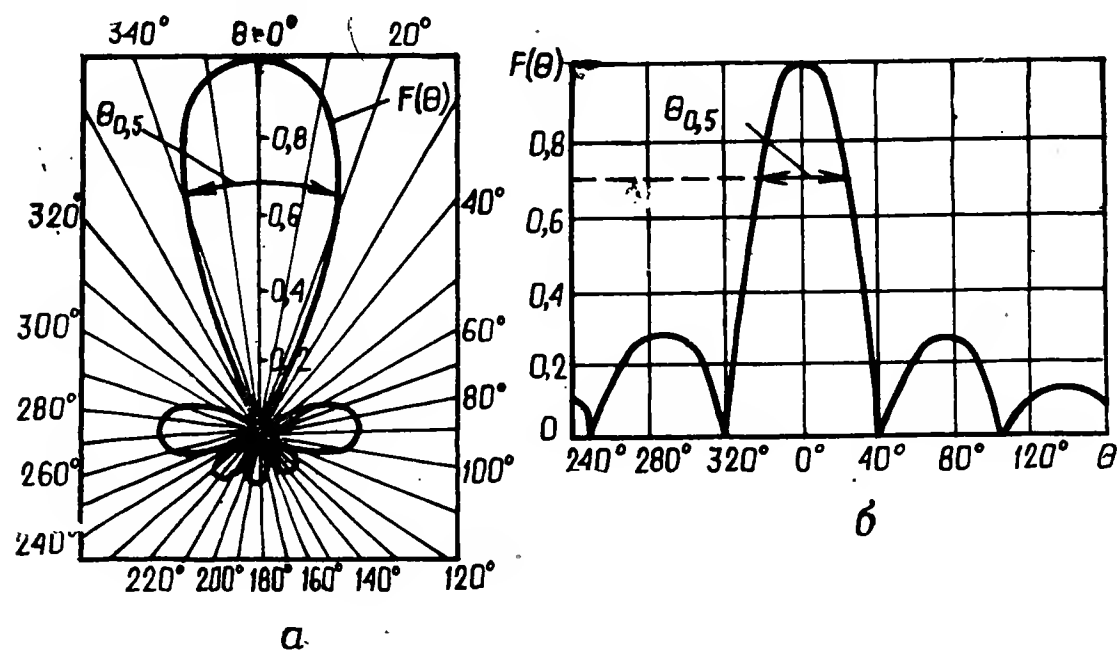


Рис. 4.3. Диаграмма направленности антенны в полярной (а) и прямоугольной (б) системах координат

Величину побочного (неосновного, паразитного) излучения оценивают относительным уровнем боковых лепестков по отношению к главному лепестку и выражают в процентах или децибелах.

Эффективная площадь антенны — отношение максимальной мощности, которая может быть отдана без учета потерь в согласованную нагрузку, к плотности мощности падающей волны. КНД антенны и ее эффективная площадь в произвольном направлении связаны соотношением

$$D(\varphi, \Theta) = \frac{4\pi}{\lambda^2} A(\varphi, \Theta). \quad (4.1)$$

Эффективная площадь меньше или равна геометрической площади раскрытия. Ее величина определяется амплитудно-фазовым распределением поля в раскрытии антенны и направлением ЭМВ, падающих на антенну.

Поляризация антенны определяется поляризацией излучаемых (принимаемых) ею ЭМВ. По виду поляризации антенны делятся на антенны с линейной и вращающейся (эллиптической, круговой) поляризацией.

Для оценки эффективности приема ЭМВ используется коэффициент поляризационной эффективности $\gamma = P_n / P_{n \max}$, где P_n — мощность в нагрузке приемной антенны; $P_{n \max}$ — мощность, которая могла бы выделяться при полном согласовании поляризаций приемной антенны и принимаемых ею ЭМВ. При приеме линейно поляризованных ЭМВ антенной с круговой поляризацией $\gamma = 0,5$.

Диапазоном антенны называют диапазон частот (длин волн), в котором ее параметры находятся в заданных пределах. Диапазон антенны определяется полосой, ограниченной максимальной f_{\max} и минимальной f_{\min} частотами. Их разность Δf называют полосой пропускания, которая часто нормируется относительно средней частоты диапазона и измеряется в процентах. Для характеристики диапазона антенны используется также коэффициент перекрытия $k_d = f_{\max} / f_{\min}$. Если $k_d = 1,2 \div 1,5$, антенна называется широкодиапазонной.

Любая антенна состоит из первичных или первичных и вторичных излучателей. Первичным излучателем называется элемент антенны, связанный с линией передачи. Излучающий элемент, не связанный с ней и возбуждаемый полем первичного излучателя, называется вторичным.

4.3. Основные типы антенн

Вибраторные антенны. На практике широко используются антенны, состоящие из прямолинейных проводников. У этих антенн отсутствует излучение вдоль оси провода, поляризация линейная, ДНА осесимметричная. Распределение тока вдоль такого проводника можно считать синусоидальным. Такие излучатели называются вибраторами. Они обладают хорошо выражен-

ными резонансными свойствами при длине $l = m\lambda/2$, $m = 1, 2, \dots$

В зависимости от способа возбуждения и распределения тока вдоль проводника эти антенны делятся на симметричные и несимметричные. Широкое применение нашел линейный симметричный вибратор длиной $l = \lambda/2$ с симметричным относительно клемм питанием (рис. 4.4, а). ДНА такого вибратора является тороидальной и в плоскости оси вибратора имеет вид восьмерки, а в плоскости, перпендикулярной оси вибратора, — вид круга (рис. 4.4, б, в).

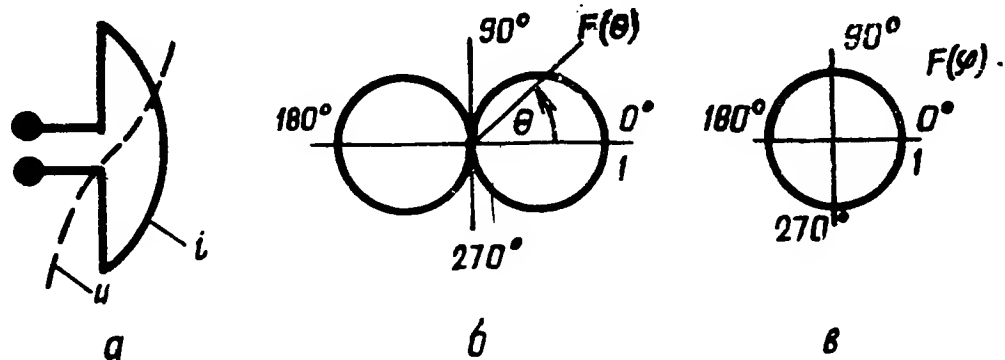


Рис. 4.4. Полуволновый вибратор (а); диаграмма направленности в плоскости вибратора (б) и в плоскости, перпендикулярной оси вибратора (в)

Одиночная вибраторная антенна является слабонаправленной. Для повышения направленности применяют многовибраторные антенны, состоящие из нескольких вибраторов, расположенных определенным образом в пространстве. Обычно излучатели устанавливаются вдоль линии или в узлах правильных решеток. Такие антенны называют антенными решетками (АР). Существуют линейные, плоские и объемные АР. При синфазном питании вибраторов максимум главного лепестка ДНА перпендикулярен плоскости решетки.

Находит применение несимметричный четвертьволновый вибратор, у которого распределение тока вдоль проводника несимметрично. Он располагается над проводящей поверхностью, соединяется одним концом с линией передачи (фидером), а другим — с проводящей поверхностью. ДНА такого вибратора такая же, как у эквивалентного симметричного вибратора, однако существует реально только одна ее половина. Линейные вибраторы используются как самостоятельно, так и в качестве элементов более сложных антенн.

Рамочные антенны. Рамочной антенной называется один или несколько последовательно соединенных витков провода. Для простоты форму рамки можно считать квадратной и рассматривать как антенну, состоящую из двух последовательно включенных вибраторов (рис. 4.5, а). Излучение вдоль нормали к рамке равно нулю. Для рамочной антенны (рис. 4.5, а) в плоскости yoz $F(\theta) = |\sin \theta|$. В плоскости xoy ДНА представляет собой окруж-

ность. Недостатком рамочной антенны является наличие у нее двуправленного приема, что не позволяет однозначно определять направление на источник излучения. Используется в качестве элементов более сложных антенн, самостоятельно в РЭС связи, навигации, разведки.

Щелевые антенны. В УКВ-диапазоне часто применяются щелевые антенны (ЩА), представляющие собой одну или несколько узких щелей, прорезанных в токонесущей поверхности волновода. Щели должны пересекать линии токов проводимости. ЩА в виде линейной щели по своим свойствам аналогична линейному вибратору, но с измененной на 90° плоскостью поляри-

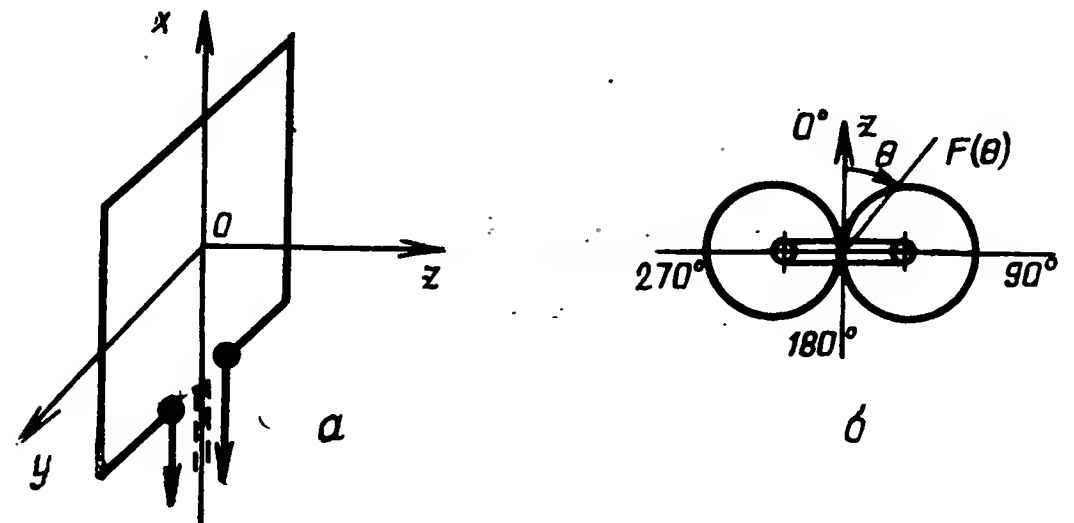


Рис. 4.5. Рамочная антенна (а) и ее диаграмма направленности (б)

зации. Для сужения ДНА используется несколько щелей (щелевая АР). ЩА используется как самостоятельно, так и в качестве элементов сканирующих АР и облучателей более сложных антенн в диапазоне СМВ и ММВ.

Волноводные и рупорные антенны. Простейшей антенной с излучающим раскрытием является волноводная антенна, представляющая собой открытый конец волновода. Раскрыв (апертуру) антенны можно рассматривать как излучающую поверхность с непрерывным распределением излучателей. Волноводные антенны имеют широкую ДНА и плохо согласованы с внешним пространством. Более узкую ДНА имеет рупорная антенна, выполненная в виде волновода с плавно расширяющимся поперечным сечением в сторону открытого конца (рис. 4.6). Направленность апертурных антенн тем выше, чем больше площадь раскрытия. Для таких антенн ширина ДН может быть приближенно определена по формуле

$$\theta_{0,5} \approx \lambda/d, \quad (4.2)$$

где d — линейный размер раскрытия.

Волноводные и рупорные антенны используются как самостоятельно, так и в качестве облучателей антенн оптического типа и элементов АР.

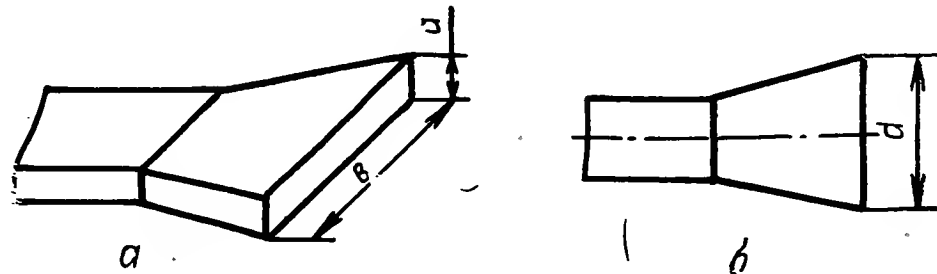


Рис. 4.6. Рупорная антенна с прямоугольным (а) и круглым (б) сечением

Антенны оптического типа. В диапазоне СВЧ применяются зеркальные и линзовые антенны. Зеркальной антенной (ЗА) называется антенна, в которой формирование ДН осуществляется в результате отражения ЭМВ первичного источника (облучателя) от отражателя (зеркала). В качестве облучателя ЗА может использоваться полуволновый вибратор или рупор (рис. 4.7, а). Обычно облучатель устанавливается в фокусе зеркала и излучает сферические ЭМВ. Зеркало изготавливается из металлических листов или сеток. Поверхности зеркала придается форма,

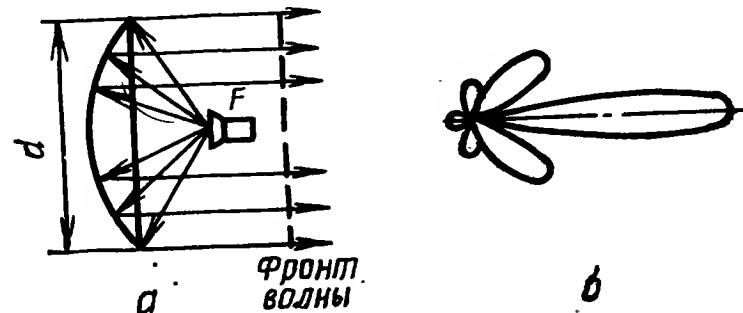


Рис. 4.7. Зеркальная антенна (а) и ее диаграмма направленности (б)

обеспечивающая формирование нужной ДНА. Наиболее распространенными являются зеркала в виде параболоида вращения или усеченного параболоида (ПЗА), параболического цилиндра (ПЦЗА) или цилиндра специального профиля. С помощью параболоида падающая сферическая волна облучателя преобразуется в плоскую. ДНА зеркальной антенны показана на рис. 4.7, б.

ПЗА используются для создания игольчатых ДН, а ПЦЗА — веерных ДН. ЗА, создающие косекансные ДН в вертикальной плоскости $F^2(\Theta) = |\operatorname{cosec} \Theta|^2$, применяются в бортовых РЛС обзора земной поверхности. Вращение облучателя вокруг фокуса ПЗА приводит к конусообразному вращению игольчатых ДН, что ис-

пользуется для создания равносигнального направления (РСН) в РЛС слежения за целью. ЗА находят применение в радиолокации, радиосвязи, радиоуправлении в диапазоне СВЧ.

Линзовые антенны (ЛА) применяются в диапазоне СВЧ для создания узких ДНА. ЛА состоит (рис. 4.8) из первичного излучателя и радиолинзы (РЛ). РЛ представляет собой прозрачное для ЭМВ ограниченное двумя поверхностями тело, показатель преломления которого n_L отличается от показателя преломления среды n_c . С помощью РЛ сферический фронт ЭМВ облучателя преобразуется в плоский. По принципу действия РЛ подобны оптическим линзам. В качестве облучателей часто используются рупоры, которые помещаются в фокусе. По виду материала РЛ разделяются на диэлектрические $n_L > n_c$ (рис. 4.8, а), металлопластинчатые $n_L < n_c$ (рис. 4.8, б). Управление положением главного лепестка осуществляется преимущественно перемещением облучателя в фокальной плоскости. На практике широко используется РЛ Люнеберга. Она имеет форму шара, показатель преломления которого плавно убывает от центра к его поверхности по закону

$$n = \sqrt{2 - \left(\frac{r}{R}\right)^2}, \quad (4.3)$$

где R — радиус линзы; r — удаление точки от центра РЛ.

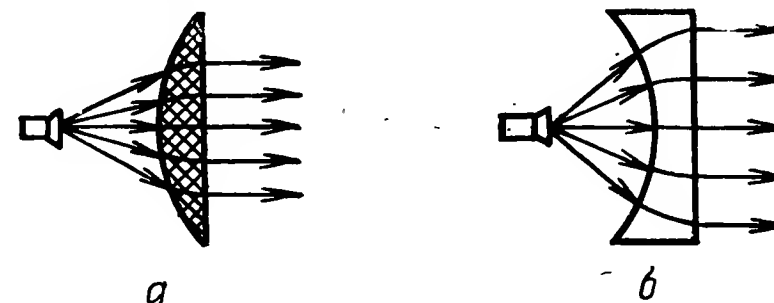


Рис. 4.8. Линзовые антенны: диэлектрическая (а); металлопластинчатая (б)

Антенны с вращающейся поляризацией. Поле с вращающейся поляризацией можно рассматривать как результат сложения двух распространяющихся в одном направлении ЭМВ с линейной поляризацией со сдвигом по фазе на 90° , плоскости поляризации которых перпендикулярны одна другой. Такое поле может быть создано с помощью двух полуволновых вибраторов, оси которых перпендикулярны, а токи отличаются по фазе на 90° . В качестве антенн с круговой поляризацией могут использоваться крестообразные щелевые антенны, а также антенны, построенные на основе волноводных и рупорных антенн. Большое применение получили спиральные антенны. Спиральная антенна состоит из спирали, питаемой обычно с конца коаксиальной линией (КЛ), и отражателя. Спиральные антенны применяются в диапазоне ДЦВ и МВ как самостоятельно, так и в каче-

стве возбуждателей рупорных антенн и облучателей зеркальных и линзовых антенн.

Антенные решетки (АР). К достоинствам АР относятся: быстрое сканирование ДНА по заданной программе, изменение формы ДН, возможность увеличения мощности излучения, получения многолепестковых ДНА.

Для реализации возможностей АР необходимо управление амплитудно-фазовым распределением сигналов отдельных излучателей. АР, в которых управление положением главного лепестка осуществляется изменением фазы сигнала каждого излучателя, называются фазированными АР (ФАР). Для изменения фазы сигнала каждого излучателя в его тракт включается фазовращатель. В таких ФАР имеет место фазовое сканирование ДНА. Если изменение фазы сигнала в излучателе осуществляется изменением частоты генератора, то в этом случае говорят о частотном сканировании ДНА.

Антенны поверхностных волн (АПВ). На границе раздела двух сред могут распространяться так называемые поверхностные (замедленные) волны. Если замедляющая система имеет бесконечную длину или согласована с нагрузкой, то волна распространяется без излучения. При конечной длине замедляющей системы без нагрузки происходит излучение ЭМВ. Такая замедляющая система называется АПВ. АПВ в общем случае состоит из возбуждателя (рупора, $\lambda/4$ — вибратора), направителя (диэлектрической пластины или ребристой структуры) и металлической пластины. Такие антенны используются в диапазонах ДЦВ, СМВ, ММВ.

Глава 5. ПРИЕМНЫЕ УСТРОЙСТВА

5.1. Основные параметры приемных устройств

Приемное устройство состоит из антенно-фидерного устройства и собственно приемника. В приемнике осуществляются селекция сигналов по частоте, их усиление и преобразование к виду, необходимому для работы выходных устройств.

Современные приемные устройства бывают двух типов: прямого усиления и супергетеродинные. Они могут быть перестраиваемыми в широком диапазоне частот или иметь фиксированную настройку на одну или несколько несущих частот. Основные параметры приемников: диапазон рабочих частот, чувствительность, избирательность, коэффициент шума.

Диапазоном рабочих частот называется диапазон возможных частот настройки приемника. Он определяется назначением РЭС и характеризуется коэффициентом перекрытия диапазона k_d , который определяется отношением максимальной частоты f_{\max} к минимальной f_{\min} .

Чувствительность приемника — мера его способности обеспечивать прием слабых радиосигналов. Наиболее часто используется понятие «чувствительность, ограниченная шумами», которая определяется минимальным уровнем радиосигнала на его входе при заданном отношении уровней полезного сигнала и шума и заданном уровне полезного сигнала на выходе приемника. Чувствительность обозначается символом $P_{\text{пр min}} (E_{\text{пр min}})$ и выражается в милливаттах (милливольтах) или в децибелах по отношению к мощности 1 Вт или 1 мВт. Чувствительность современных приемников находится в пределах $1 \cdot 10^{-9} — 1 \cdot 10^{-19}$ Вт. Она ограничивается внутренними шумами, а также внешними помехами, наводимыми в антенне. Основную роль играют шумы первых каскадов, поскольку они усиливаются в большей степени.

Избирательность (селективность) приемника характеризует способность приемника выделять и усиливать полезные сигналы и не пропускать мешающие сигналы. Избирательность обеспечивается использованием различий полезного и мешающих сигналов по поляризации, частоте, амплитуде, фазе, длительности и др. В тех случаях, когда спектры полезных и мешающих сигналов не перекрываются, применяется частотная избирательность, реализуемая с помощью резонансных контуров и систем. Избирательность определяется формой амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) линейной части приемника (каскады до детектора). АЧХ представляет собой зависимость модуля передаточной функции $K(\omega)$ от частоты:

$$K(\omega) = |\dot{K}(\omega)| = |K(\omega) e^{-j\varphi(\omega)}|, \quad (5.1)$$

где $\varphi(\omega)$ — фазово-частотная характеристика.

Максимум АЧХ соответствует настройке приемника на частоту $\omega_0 (f_0)$. АЧХ в нормированном виде (рис. 5.1) задается уравнением $\gamma(f) = K(f)/K(f_0)$. Диапазон частот, в пределах которого величина $\gamma(f)$ превышает уровень $1/\sqrt{2} = 0,707$ (—3 дБ), называется полосой пропускания приемника. Полосу пропускания приемника можно определить и на другом уровне. Ширина полосы пропускания $\Delta f_{\text{пр}} = f_v - f_n$, где f_v и f_n — верхняя и нижняя граничные частоты, которые находятся из уравнения

$$\gamma(f) = \frac{1}{\sqrt{2}}.$$

АЧХ позволяет определить ослабление сигнала на выходе линейной части при расстройке $\Delta f = f_c - f_0$. Здесь f_0 — частота настройки; f_c — несущая частота принимаемого сигнала.

Эффективность функционирования приемника при отсутствии внешних мешающих воздействий в существенной степени определяется уровнем его внутренних (собственных) шумов. Их наличие снижает отношение сигнал/шум на выходе линейной части приемника по сравнению с отношением сигнал/шум на его входе. Источниками шума в приемнике являются резисторы, элект-

ронные и полупроводниковые приборы. При этом основную роль играют шумы входных цепей приемника, так как они усиливаются его последующими каскадами. Мощность внутренних шумов приемника определяется выражением

$$P_{ш. пр} = kT(k_{ш} - 1)\Delta f_{пр}, \quad (5.2)$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К — постоянная Больцмана; T — температура резистора в кельвинах; $\Delta f_{пр}$ — полоса пропускания приемника, в пределах которой усиливаются шумы; $k_{ш}$ — коэффициент шума (шум-фактор).

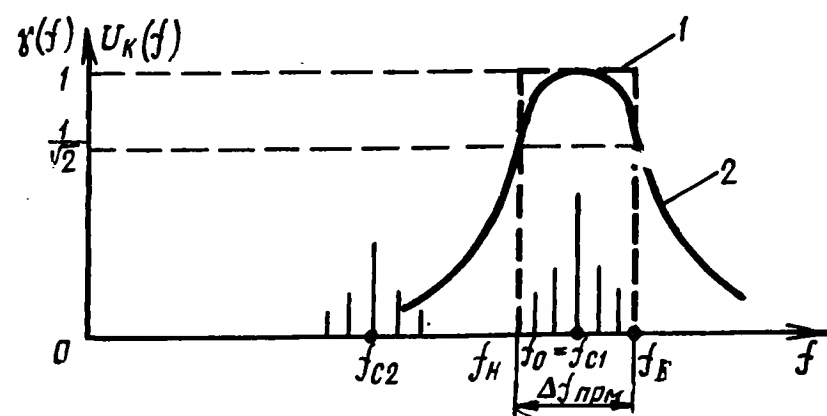


Рис. 5.1. Амплитудно-частотная характеристика линейной части приемника

Коэффициент шума $k_{ш}$ показывает, во сколько раз возрастает отношение мощностей шума и сигнала на выходе линейной части приемника по сравнению с аналогичным отношением на входе. Для уменьшения уровня внутренних шумов в первых каскадах приемника применяют малошумящие усилители (параметрические, ЛБВ и др.).

5.2. Основные структурные схемы приемников

В состав приемника входят линейная часть (избирательный усилитель), детектор и усилитель звуковой частоты УЗЧ (рис. 5.2). Линейная часть осуществляет частотную селекцию и основное уси-

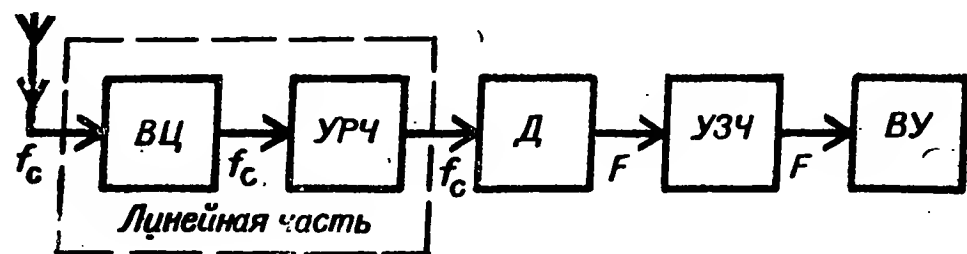


Рис. 5.2. Структурная схема приемника прямого усиления:
ВЦ — входная цепь; УРЧ — усилитель радиочастоты; Д — детектор;
УЗЧ — усилитель звуковой частоты; ВУ — выходное устройство

ление полезного радиосигнала. Для неискаженного приема полезного сигнала и подавления мешающих сигналов необходимо, чтобы АЧХ линейной части приемника имела прямоугольную форму (кривая 1, рис. 5.1) с шириной, равной полосе частот спектра радиосигнала, а фазово-частотная характеристика была линейной. Оптимальная форма АЧХ и ее ширина определяются спектром полезного сигнала, видом и уровнем мешающих сигналов, критерием оптимальности и др. При настройке приемника на заданные частоты диапазона величина $K(f_0)$, ширина АЧХ и ее форма не должны подвергаться существенным изменениям.

Линейная часть содержит несколько каскадов, соединенных последовательно. Общее усиление равно произведению коэффициентов усиления этих каскадов. В зависимости от схемы выполнения линейной части различают приемники прямого усиления и супергетеродинные приемники.

Приемники прямого усиления. В таких приемниках радиосигнал выделяется и усиливается на несущей радиочастоте f_c . При этом АЧХ сигнала при прохождении через линейную часть не должен подвергаться существенным искажениям. Структурная схема приемника изображена на рис. 5.2. Она состоит из входной цепи (ВЦ), усилителя радиочастоты (УРЧ), детектора и УЗЧ. Принятый антенной радиосигнал через ВЦ поступает на вход УРЧ. Здесь сигнал усиливается одним или несколькими каскадами и поступает на вход детектора. Продетектированный сигнал после усиления в УЗЧ подается на выходное устройство, где воспроизводится в форме, удобной для получателя информации.

В некоторых приемниках при достаточной мощности входного сигнала детектор подключается непосредственно к ВЦ. Такие приемники называются детекторными. Детекторные приемники имеют низкую чувствительность и плохую избирательность, поэтому они нашли ограниченное применение. ВЦ и УРЧ содержат в своем составе резонансные элементы, с помощью которых обеспечивается настройка на частоту f_c . Достоинствами приемников прямого усиления являются их простота, отсутствие дополнительных каналов приема, а недостатками — низкая избирательность, расширение полосы пропускания и уменьшение коэффициента усиления при перестройке от минимальных к максимальным частотам рабочего диапазона.

Супергетеродинные приемники. В таком приемнике (рис. 5.3) принимаемые сигналы несущей частоты f_c преобразуются в сигналы промежуточной частоты $f_{пр}$. На этой частоте осуществляются их основная избирательность, усиление и детектирование.

Приемник состоит из ВЦ, преобразователя частоты, усилителя промежуточной частоты, детектора и УЗЧ. Для повышения чувствительности и избирательности по зеркальному каналу может использоваться УРЧ с настраиваемым контуром. Назначение ВЦ, УРЧ, детектора и УЗЧ аналогично приемнику прямого усиления. С помощью преобразователя, состоящего из гетеродина и смеси-

теля, осуществляется перенос спектра радиосигнала с частоты f_c на постоянную для данного приемника частоту $f_{пр} = |f_c - f_r|$.

При приеме сигнала с частотой f_c частота гетеродина f_r должна быть такой, чтобы на выходе смесителя получались колебания с частотой $f_{пр}$. Настройка приемника на заданную частоту f_c

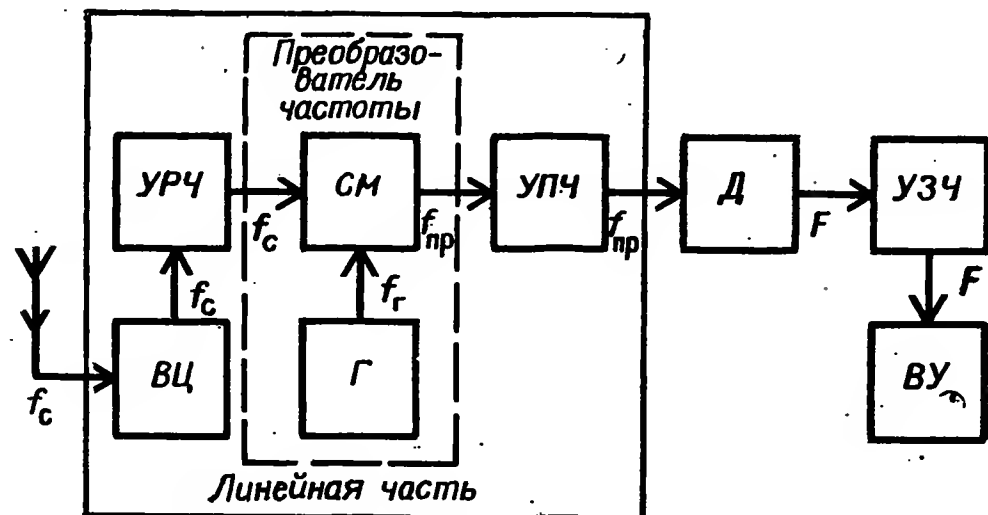


Рис. 5.3. Структурная схема супергетеродинного приемника:
СМ — смеситель; Г — гетеродин; УПЧ — усилитель промежуточной частоты

производится путем настройки гетеродина на частоту $f_r = f_c - f_{пр}$. Основное усиление и избирательность полезного сигнала осуществляются УПЧ. Частота настройки и полоса пропускания УПЧ являются постоянными и при перестройке не меняются.

К достоинствам приемника относятся высокие избирательность и чувствительность, к недостаткам — сложность, наличие кроме основного побочных каналов приема (зеркальный канал, канал на $f_{пр}$). Наличие зеркального канала объясняется тем, что процесс преобразования происходит одинаково как для полезного сигнала с частотой f_c , так и для сигнала зеркального канала с частотой $f_z = f_c - 2f_{пр}$, расположенных симметрично относительно частоты f_r (рис. 5.4). Если сигнал с частотой f_c является сигналом нужной станции, то сигнал f_z может быть создан на входе приемника мешающей станцией. Кроме приема по зеркальному каналу возможен прием сигналов станции, работающей на частоте $f_{пр}$. Избирательность по зеркальному каналу улучшается путем использо-

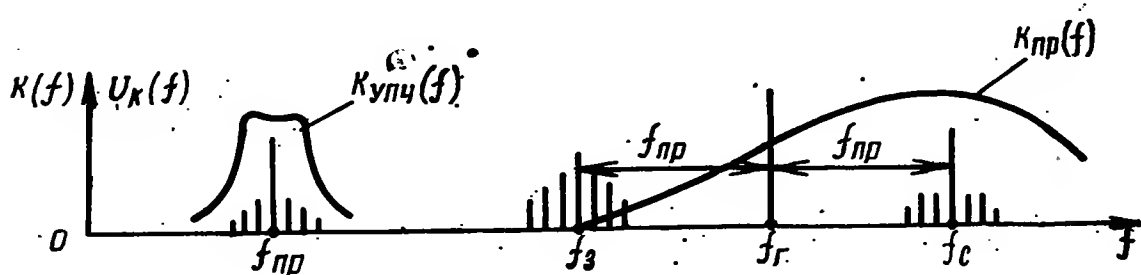


Рис. 5.4. Изменение спектра радиосигналов при преобразовании частоты

вания настраиваемых ВЧ и УРЧ (преселекторов). Для уменьшения влияния помех по $f_{пр}$ используются заградительные фильтры. Назначение АД и УЗЧ аналогично приемнику прямого усиления.

В качестве усилительных приборов в приемниках используются лампы, транзисторы, а в диапазоне СВЧ — ЛБВ, туннельные диоды, диоды Ганна, полевые и биполярные транзисторы, квантовые усилители (мазеры).

Квантовые усилители обладают низким уровнем собственных шумов. Они эффективно работают в диапазоне 300 МГц — 75 ГГц и более.

В ИК-технике находят применение фотоэлектрические и тепловые приемники излучений. В фотоэлектрических приемниках происходит непосредственное взаимодействие лучистого потока с носителями электричества, в результате которого носители получают дополнительную энергию (внешний фотоэффект) либо изменяют его проводимость (внутренний фотоэффект). В качестве приемников излучений с внешним фотоэффектом используются фотоэлементы, электронно-оптические преобразователи, фотоэлектрические умножители, в качестве приемников излучения с внутренним фотоэффектом — фоторезисторы, фотогальванические элементы. Из тепловых приемников наиболее распространены термоэлементы и болометры.

5.3. Преобразование частоты

Преобразователем называется электрическая цепь, осуществляющая преобразование частоты и включающая гетеродин, смеситель и полосовой фильтр. В некоторых случаях полосовой фильтр может отсутствовать.

Рассмотрим принцип преобразования частоты на примере АМ-радиосигнала:

$$u_c = U_{mc}(t) \cos \omega_c t = U_{mc} [1 + m_c(t)] \cos \omega_c t. \quad (5.3)$$

Этот сигнал вместе с колебаниями гетеродина $u_r = U_{mr} \cos \omega_r t$ подается на смеситель. В смесителе осуществляется их перемножение с коэффициентом k_1 . Сигнал разностной частоты, образованный при перемножении, фильтруется полосовым фильтром. В результате на выходе смесителя получается сигнал

$$u_{с\kappa} = k_1 \overline{u_r u_c} = 0,5 k_1 U_{mr} U_{mc}(t) [\cos(\omega_c - \omega_r)t + \cos(\omega_c + \omega_r)t] = k_{с\kappa} U_{mc} [1 + m_c(t)] \cos \omega_{пр} t. \quad (5.4)$$

Здесь $k_{с\kappa} = 0,5 k_1 U_{mr}$ — коэффициент передачи смесителя; $\omega_{пр} = |\omega_c - \omega_r|$ — промежуточная частота.

Черта вверху — операция усреднения по времени реализуется с помощью полосового фильтра.

Из выражения (5.4) видно, что закон модуляции преобразованного колебания на выходе смесителя такой же, как исходного

сигнала, следовательно, при преобразовании частоты происходит перенос с точностью до постоянного множителя спектра сигнала (5.3) с частоты f_c на частоту $f_{пр}$.

5.4. Детектирование радиосигналов

Детектирование — процесс преобразования модулированного напряжения несущей (промежуточной) частоты в модулирующее напряжение звуковой, или видеочастоты. В результате детектирования спектр радиосигнала преобразуется в спектр модулирующего сигнала. В зависимости от вида модуляции различают амплитудное, частотное и фазовое детектирование. Устройства, осуществляющие данные преобразования, называют соответственно амплитудными, частотными и фазовыми детекторами. Детекторы, как правило, содержат нелинейный элемент и сглаживающий фильтр.

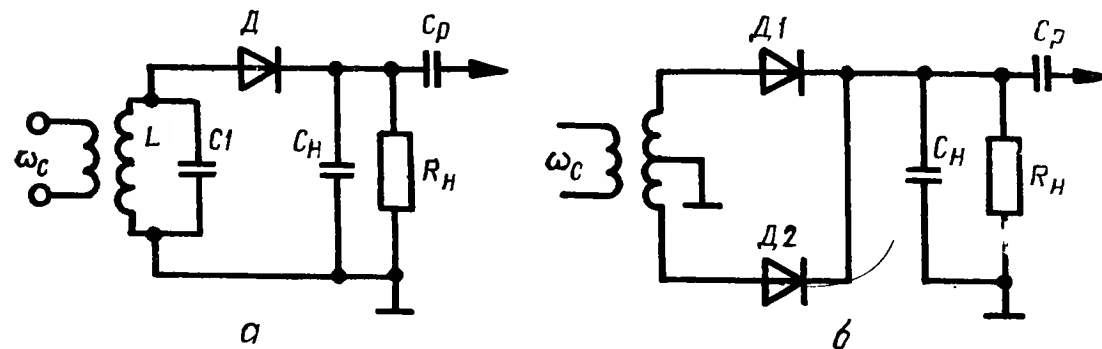


Рис. 5.5. Амплитудный детектор: последовательная схема (а); двухполупериодная схема (б)

Амплитудные детекторы (АД). Для детектирования слабых АМ-радиосигналов используются квадратичные детекторы, в которых детектирование происходит на начальном участке вольт-амперной характеристики нелинейного элемента (характеристика вида $i_d = k u_{вх}^2$). При детектировании сигналов высокого уровня используются линейные детекторы. Детектирование осуществляется на линейном участке вольт-амперной характеристики. В качестве нелинейного элемента используется полупроводниковый (рис. 5.5) или ламповый диод. При достаточном входном сигнале характеристику диода можно представить в виде кусочно-линейной функции (рис. 5.6, а).

Нагрузкой диода является $R_n C_n$ — фильтр нижних частот. При действии на входе АД радиосигнала (рис. 5.6, б) через диод протекают импульсы тока (рис. 5.6, в), амплитуда которых изменяется по закону изменения огибающей входного сигнала. Импульсы тока, протекая через конденсатор C_n , заряжают его. В интер-

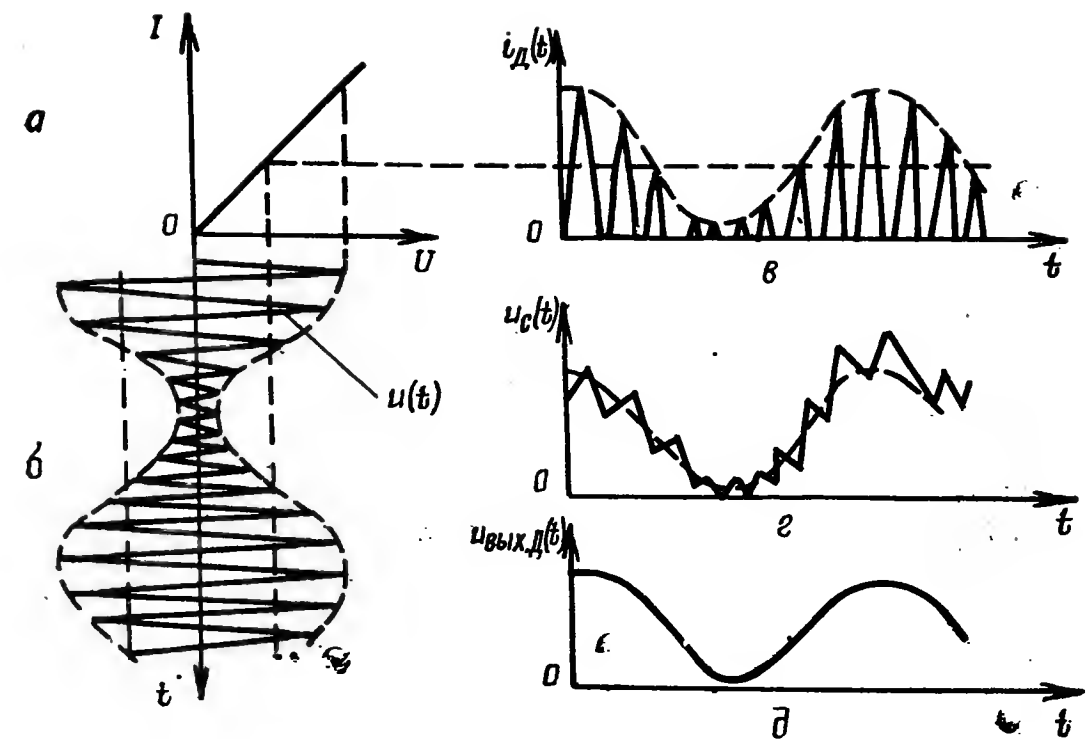


Рис. 5.6. Процессы, происходящие в амплитудном детекторе: вольт-амперная характеристика диода (а); АМ-радиосигнал (б); ток, протекающий через диод (в); напряжение на конденсаторе C (г); напряжение на выходе (д)

валах между импульсами ток, протекающий через диод, равен нулю, и C_n разряжается через резистор R_n (рис. 5.6, г).

Если $\frac{1}{f_c} \ll R_n C_n \ll \frac{1}{F_v}$, где F_v — верхняя частота спектра огибающей радиосигнала, напряжение на C_n будет повторять закон изменения огибающей входного радиосигнала (рис. 5.6, д). Для уменьшения искажений применяют АД, состоящие из двух диодов, включенных навстречу один другому (рис. 5.5, б). Вольт-амперная характеристика такого АД имеет вид ломаной кривой и является четной функцией

$$i_d = k_1 |u_{вх}(t)|.$$

Если пренебречь реакцией фильтра на работу детектора, то напряжение на его выходе можно записать в виде

$$u_{АД} = k_2 |\overline{u_{вх}(t)}| = k_2 |\overline{u_c(t)}|. \quad (5.5)$$

Здесь k_1 и k_2 — коэффициенты пропорциональности. Черта сверху — операция усреднения сигнала по времени, которая реализуется с помощью фильтра $R_n C_n$.

Подставив в формулу (5.5) выражение (5.3), получим

$$u_{АД} = k_2 U_{mc}(t) |\overline{\cos \omega_c t}| = k_{АД} U_{mc} [1 + m_c(t)], \quad (5.6)$$

где $k_{АД} = 2k_2/\pi \approx 0,9$ — коэффициент передачи АД.

Из выражения (5.6) следует, что напряжение на выходе АД с точностью до постоянного множителя и слагаемого повторяет модулирующий сигнал источника излучения. Постоянная составляющая этого напряжения отделяется конденсатором C_p и на выход не проходит.

Изменение спектра АМ-радиосигнала при детектировании представляет процесс переноса спектра модулированного колебания с частотой f_0 ($f_{пр}$) на нулевую частоту, а симметрично расположенные составляющие $f_0 \pm F_i$ переносятся на частоту F_i . При детектировании радиосигнала с шириной спектра Δf_c (рис. 5.7, а) получается сигнал с полосой $\Delta F_c = 0,5 \Delta f_c$ (рис. 5.7, б).

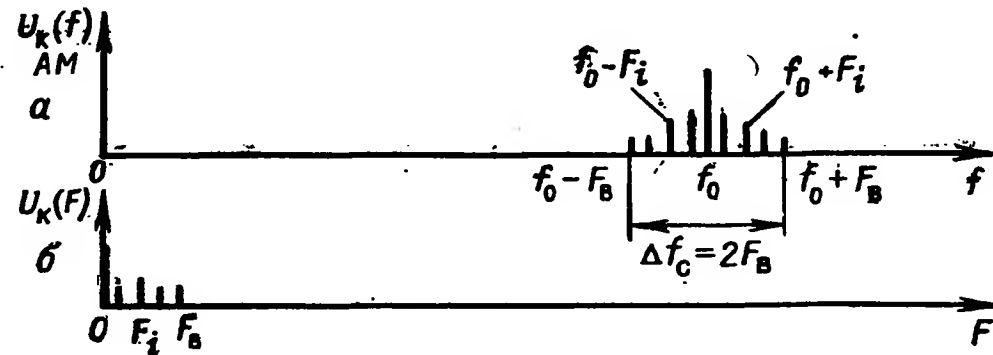


Рис. 5.7. Перенос спектра радиосигнала при амплитудном детектировании: спектр АМ-радиосигнала (а); спектр сигнала на выходе амплитудного детектора (б)

Фазовые детекторы. В радиосигналах с ФМ изменение приращения фазы повторяет закон модулирующего сигнала (сообщения), т. е.

$$\Delta\varphi(t) = \varphi(t) - \omega_c t = k_{ФМ} u_M(t).$$

Общее выражение ФМ-радиосигналов имеет вид

$$u_c = U_{mc} \cos [\omega_c t + k_{ФМ} u_M(t)]. \quad (5.7)$$

С помощью ФД производится перемножение двух подводимых сигналов одинаковой частоты и усреднение полученного результата по времени с помощью фильтра нижних частот (ФНЧ). Одним из этих сигналов является входной радиосигнал (5.7), а другим — опорное колебание

$$u_{оп} = U_{mo} \cos \omega_c t.$$

Если амплитуда опорного колебания постоянна, выходное напряжение ФД определяется выражением

$$u_{ФД} = k_1 \overline{u_c u_{оп}} = 0,5 k_1 U_{mo} U_{mc} [\cos \Delta\varphi(t) + \cos(2\omega_c t + \Delta\varphi)] = k_{ФД} U_{mc} \cos \Delta\varphi(t) = k_{ФД} U_{mc} \cos k_{ФМ} u_M(t), \quad (5.8)$$

где $k_{ФД} = 0,5 k_1 U_{mo}$ — коэффициент передачи ФД.

Из выражения (5.8) видно, что сигнал на выходе ФД пропорционален косинусу разности фаз подводимых сигналов. Зависимость выходного напряжения ФД от величины разности фаз, действующих на входе напряжений, называется его дискриминационной характеристикой (рис. 5.8).

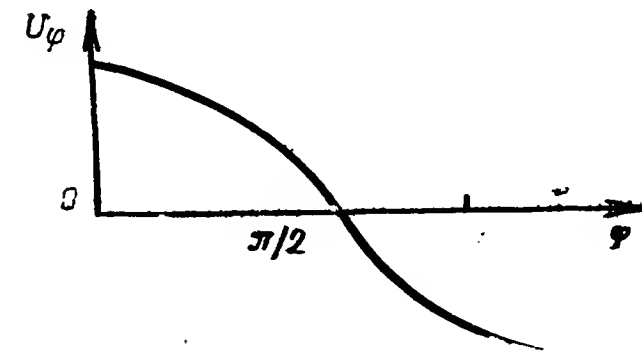


Рис. 5.8. Дискриминационная характеристика фазового детектора

Если подводимые напряжения сдвинуть на 90° , сигнал на выходе ФД определяется выражением

$$u_{ФД} = k_{ФД} U_{mc} \sin \Delta\varphi(t). \quad (5.9)$$

При $\Delta\varphi(t) \ll 1$ выражение (5.9) упрощается и принимает вид

$$u_{ФД} = k_{ФД} U_{mc} \Delta\varphi(t) = k_{ФМ} k_{ФД} U_{mc} u_M(t). \quad (5.10)$$

Из этого выражения следует, что напряжение на выходе ФД с точностью до постоянного множителя повторяет закон передаваемого сообщения. Кроме того, это напряжение зависит также от амплитуды входного сигнала U_{mc} . Для устранения этой зависимости используются схемы автоматической регулировки усиления АРУ или ограничители. Принцип действия балансного ФД поясняет рис. 5.9.

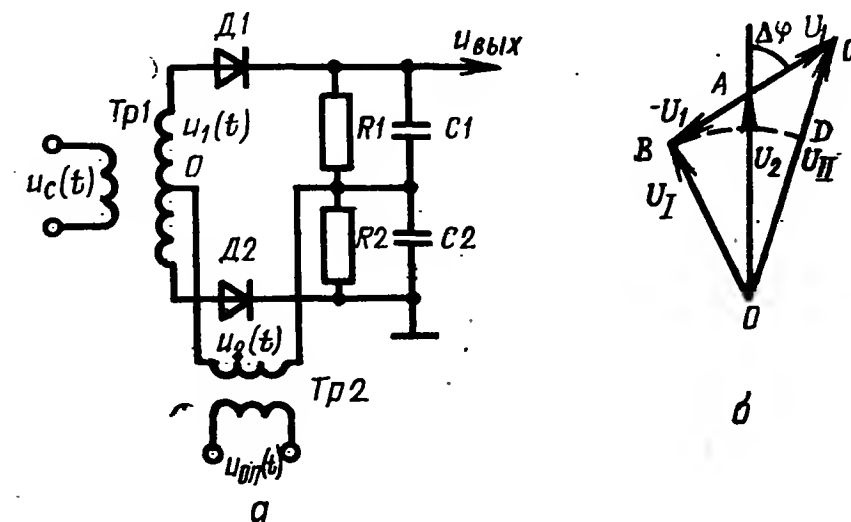


Рис. 5.9. Фазовый детектор (а); векторная диаграмма напряжений (б)

Фазовый детектор состоит из двух суммирующих трансформаторов (Тр1 и Тр2) и двух идентичных амплитудных детекторов (диоды Д1 и Д2 с фильтрами R1, C1 и R2, C2). Параметры выбираются обычно так, что $R1=R2=R$, $C1=C2=C$. Причем $RC \gg 1/f_c$. Суммирование сигналов достигается последовательным соединением вторичных обмоток трансформаторов Тр1 и Тр2. Вторичная обмотка трансформатора Тр1 является симметричной относительно средней точки O. Напряжение на входах обоих детекторов

$$u_{вх1} = u_1(t) + u_2(t); \quad u_{вх2} = -u_1(t) + u_2(t).$$

Здесь $u_1(t)$ и $u_2(t)$ — напряжения на вторичных обмотках трансформаторов Тр1 и Тр2.

Выходное напряжение ФД равно разности напряжений на выходах амплитудных детекторов:

$$u_{ФД} = u_{АД1} - u_{АД2}.$$

Принцип действия ФД поясняется векторной диаграммой, изображенной на рис. 5.9, б. Пусть

$$u_c(t) = U_{mc} \cos(\omega_c t + \Delta\psi); \quad u_{оп}(t) = U_{mo} \cos \omega_c t.$$

Векторы напряжений на входах первого и второго амплитудных детекторов:

$$\vec{U}_1 = \vec{U}_2 - \vec{U}_1; \quad \vec{U}_{II} = \vec{U}_2 + \vec{U}_1,$$

где \vec{U}_2 и \vec{U}_1 — векторы напряжений, характеризующие амплитуды напряжений на вторичной обмотке трансформатора Тр2 и одной из половин обмотки трансформатора Тр1.

Напряжение на выходе фазового детектора пропорционально разности амплитуд напряжений на входах амплитудных детекторов:

$$u_{вых} = k_{АД}(U_{II} - U_1),$$

где $k_{АД}$ — коэффициент передачи амплитудного детектора.

Если $\Delta\psi = \pi/2$, то отрезок $DC = 0$ и $u_{вых} = 0$. При $\Delta\psi < \pi/2$ $u_{вых} > 0$, при $\Delta\psi > \pi/2$ напряжение $u_{вых}$ изменит свой знак на противоположный.

В общем случае

$$\begin{aligned} U_1 &= \sqrt{(U_2 - U_1 \cos \psi)^2 + U_1^2 \sin^2 \psi} = \\ &= U_2 \sqrt{1 + \left(\frac{U_1}{U_2}\right)^2 - 2 \frac{U_1}{U_2} \cos \psi}. \end{aligned}$$

Предположим, что $U_2 \gg U_1$, тогда $(U_1/U_2)^2 \approx 0$. В этом случае последнее выражение упрощается и примет вид

$$U_1 \approx U_2 \sqrt{1 - 2 \frac{U_1}{U_2} \cos \psi}.$$

Разложим это выражение в ряд и ограничимся линейным членом, в результате получим

$$U_1 \approx U_2 \left(1 - \frac{U_1}{U_2} \cos \psi\right).$$

Аналогично для U_{II} получим

$$U_{II} \approx U_2 \left(1 + \frac{U_1}{U_2} \cos \psi\right).$$

Следовательно, напряжение на выходе ФД

$$u_{вых} = 2k_{АД}U_1 \cos \psi = k_{ФД}U_1 \cos \psi,$$

где $k_{ФД} = 2k_{АД}$.

Из этого выражения видно, что напряжение на выходе балансного фазового детектора пропорционально косинусу разности фаз, подаваемых на входы сигналов, что удовлетворяет требованиям, предъявляемым к ФД.

Частотный детектор (ЧД). В радиосигналах с ЧМ изменение приращения частоты повторяет закон изменения модулирующего сигнала (сообщения), т. е.

$$\Delta\omega(t) = \omega(t) - \omega_c = k_{ЧМ}u_m(t).$$

Общее выражение ЧМ-радиосигнала имеет вид

$$u_{ЧМ} = U_{mc} \cos \left[\omega_c t + k_{ЧМ} \int_0^t u_m(t) dt \right]. \quad (5.11)$$

Детектирование ЧМ-колебаний осуществляется ЧД. На выходе ЧД вырабатывается напряжение, меняющееся во времени согласно модуляционным изменениям мгновенной радио- или промежуточной частоты принимаемого сигнала.

Зависимость этого напряжения от частоты колебаний на входе называется детекторной (дискриминационной) характеристикой ЧД $u_{ЧД} = \varphi(f)$. Частота $f_0(f_{пр})$, при которой напряжение равно нулю, называется переходной. Часто дискриминационной характеристикой ЧД называют зависимость этого напряжения от расстройки $\Delta f = f - f_0$. Для линейного участка этой характеристики справедливо соотношение

$$u_{ЧД} = k_{ЧД}(f - f_0) = k_{ЧД} \Delta f, \quad (5.12)$$

где $k_{ЧД}$ — коэффициент передачи ЧД.

В ЧД, как правило, изменения частоты сигнала преобразуются в соответствующие изменения его амплитуды, которые детектируются АД. Для преобразования ЧМ-сигналов в АМ может использоваться расстроенный колебательный контур, у которого середина одной из ветвей резонансной кривой совпадает с частотой $f_0(f_{пр})$. Для повышения линейности и ширины дискриминационной характеристики используют два расстроенных контура

(рис. 5.10, а). Принцип действия такого ЧД поясняется графиками, изображенными на рис. 5.10, б, в.

Частотный детектор состоит из двух контуров, нагруженных на амплитудные детекторы Д1, R1, C1 и Д2, R2, C2, включенные навстречу один другому. Контур I и II взаимно расстроены на величину $2\Delta f_p$ (рис. 5.10, б). Амплитуда напряжения, подаваемого с контура на амплитудный детектор, зависит от частоты f .

Если частота $f=f_0$, амплитуды сигналов на входах амплитудных детекторов будут равными. Следовательно, напряжение на выходе частотного детектора равно нулю.

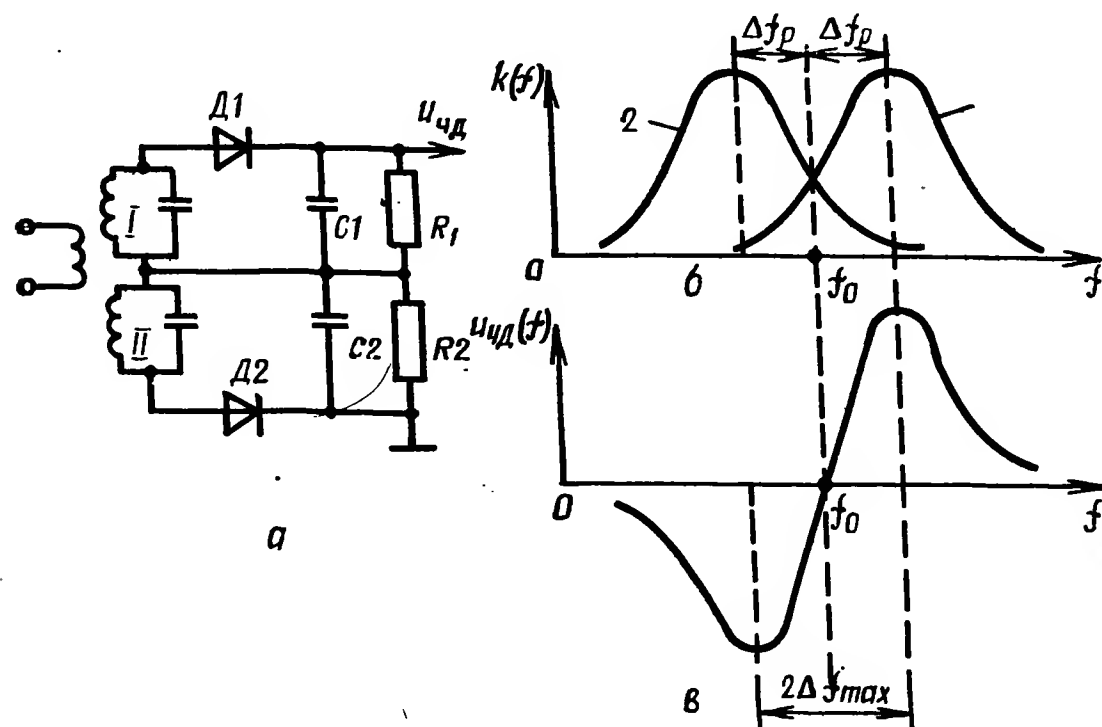


Рис. 5.10. Частотный детектор (а); амплитудно-частотные характеристики расстроенных контуров (б); дискриминационная характеристика (в)

Частота f_0 , соответствующая точке взаимного пересечения амплитудно-частотных характеристик контуров I и II, называется переходной.

При $\Delta f = f - f_0 > 0$ $u_{чд} > 0$.

Если $\Delta f = f - f_0 < 0$, $u_{чд} < 0$.

При малых расстройках Δf выходное напряжение $u_{чд}$ является пропорциональным Δf .

При больших расстройках напряжение на контурах существенно падает. Следовательно, уменьшается и выходное напряжение (рис. 5.10, в).

Выходное напряжение $u_{чд}$ можно представить в виде

$$u_{чд} = k_{АД}(U_1 - U_2),$$

где $k_{чд}$ — коэффициент передачи амплитудных детекторов; U_1 и U_2 — амплитуды напряжений на контурах I и II, которые определяются выражениями:

$$U_1 = K(f_0 - \Delta f) U_{твх};$$

$$U_2 = K(f_0 + \Delta f) U_{твх}.$$

Если амплитудно-частотные характеристики фильтров I и II разложим в ряд в окрестности точки f_0 и ограничимся линейным членом разложения, получим

$$K(f) = K(f_0 \pm \Delta f) = K(f_0) \mp |K'(f)|_{f=f_0} \Delta f.$$

С учетом этих выражений напряжение на выходе частотного детектора

$$u_{чд} = 2k_{АД} |K'(f)|_{f=f_0} \Delta f(t) = k_{чд} \Delta f(t).$$

В этом выражении $|K'(f)|_{f=f_0}$ — модуль производной АЧХ контура в точке $f=f_0$, $k_{чд}$ — коэффициент передачи частотного детектора.

Из последнего выражения видно, что на выходе ЧД, выполненного на расстроенных контурах, в пределах ширины дискриминационной характеристики $2\Delta f_{max}$ напряжение $u_{чд}$ повторяет закон изменения частоты ЧМ-радиосигнала.

5.5. Автоматические регулировки приемников

Под действием дестабилизирующих факторов могут изменяться частоты гетеродина и принимаемого сигнала. Вследствие этого их разностная частота может существенно отличаться от $f_{пр}$. В этих условиях прием полезных сигналов может оказаться невозможным. Для того чтобы сохранить разностную частоту близкой к $f_{пр}$, необходимо постоянно корректировать частоту f_r . Подстройка может осуществляться вручную или автоматически с помощью схемы автоматической подстройки частоты (АПЧ).

В схеме АПЧ содержится ЧД (ФД), который реагирует на величину и знак расстройки. На выходе ЧД вырабатывается напряжение, пропорциональное расстройке. Это напряжение воздействует на управляющий элемент, который изменяет частоту f_r так, чтобы разностная частота стала близкой к $f_{пр}$.

Для автоматического поддержания на заданном уровне величины выходных сигналов (без искажения их формы) при значительных изменениях сигналов на входе применяются системы АРУ. Работа АРУ основана на изменении коэффициента усиления приемника в зависимости от величины входных сигналов. При их возрастании коэффициент усиления падает под действием регулирующего напряжения, вырабатываемого системой АРУ в результате амплитудного детектирования выходных сигналов. Более подробно принцип действия системы АПЧ и АРУ рассмотрен в гл. 6.

А. ПРИНЦИПЫ ПОЛУЧЕНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ

6.1. Принципы радиолокации объектов

Радиолокация — область радиоэлектроники, включающая методы и средства получения информации об объектах (физических телах) за счет приема и анализа радиоволн, излучаемых или переизлучаемых (отражаемых) ими. Объекты радиолокации называют радиолокационными целями. Последние могут быть наземными (наземные сооружения, танки, ракетные установки), воздушными (самолеты, вертолеты, ракеты), космическими (ИСЗ, боеголовки баллистических ракет), надводными (корабли). Совокупность сведений о целях — дальность до цели, угловые координаты (направление на цель), параметры движения цели, получаемые с помощью средств радиолокации, называют радиолокационной информацией. Радиоэлектронные средства, предназначенные для получения радиолокационной информации, называют радиолокационными средствами (радиолокационными станциями — РЛС).

В зависимости от природы электромагнитного излучения, доставляющего информацию об объекте радиолокационного наблюдения, различают активную, полуактивную и пассивную радиолокацию.

При активной радиолокации информацию об объекте получают путем его облучения зондирующими сигналами и приема сигналов, отраженных от него или переизлученных им. Передатчик и приемник РЛС в этом случае совмещены (находятся в одной точке).

При полуактивной радиолокации информацию об объекте получают так же, как и при активной радиолокации, но передатчик зондирующих сигналов и приемник отраженных от объекта сигналов при полуактивной радиолокации разнесены в пространстве. Передатчик может быть размещен на земле (самолете), а приемник — на ракете, наводимой на цель. Использование средств активной и полуактивной радиолокации позволяет определять угловые координаты объекта относительно некоторой фиксированной точки в пространстве (например, относительно РЛС), дальность до объекта и скорость его движения. Наличие данных об угловых координатах и дальности дает возможность определять местоположение объектов в пространстве.

Пассивная радиолокация основана на приеме радиоволн, излучаемых самим объектом или РЭС, установленном на нем. При приеме этого излучения в одной точке пространства можно определить только угловые координаты объекта. Для определения местоположения объекта в пространстве необходимо

определение направлений на объект, как минимум, из двух точек пространства.

По виду излучаемых радиосигналов различают РЛС с непрерывным и импульсным (большой или малой скважности) излучением. В зависимости от предназначения РЛС подразделяются на РЛС обнаружения и РЛС автоматического сопровождения целей. РЛС обнаружения работают в режиме обзора воздушного пространства или земной поверхности. В военных целях применяются для обнаружения воздушных или наземных объектов, определения их координат и параметров движения. РЛС автоматического сопровождения работают в режиме непрерывного слежения за объектом по направлению (угловым координатам), дальности или скорости. С помощью этих РЛС представляется возможность получать радиолокационную информацию о цели непрерывно. Нашли широкое применение в системах управления оружием, например в системах наведения ракет класса «земля — воздух», «воздух — воздух» и «воздух — земля».

В основу определения координат и параметров движения объектов с помощью РЛС положены следующие свойства ЭМВ: способность ЭМВ отражаться от объектов, встречающихся на пути их распространения, прямолинейность и постоянство скорости распространения ЭМВ в однородной среде и, наконец, эффект Доплера (изменение частоты сигналов, отраженных от объектов, по сравнению с частотой зондирующих сигналов при наличии радиальной составляющей скорости движения объекта относительно РЛС).

При активной радиолокации измерение дальности до цели (дальность РЛС — цель) основано на определении времени t_D распространения (времени запаздывания) ЭМВ от РЛС до объекта и обратно. Дальность до цели D_D и время запаздывания t_D связаны соотношением

$$D_D = ct_D / 2, \quad (6.1)$$

где $c = 3 \cdot 10^8$ м/с — скорость распространения ЭМВ в свободном пространстве.

Принцип определения дальности до объекта основан на фиксации моментов излучения зондирующего сигнала, приема отраженного от него сигнала и измерения временного интервала между этими сигналами.

Как уже отмечалось, ЭМВ распространяются в свободном пространстве по прямолинейной траектории. Это свойство ЭМВ положено в основу определения направления (угловых координат) на источник электромагнитного излучения (ЭМИ). Измерение угловых координат сводится к определению направления прихода ЭМВ, излучаемых или переизлучаемых объектом.

Измерение радиальной составляющей скорости движения объекта V_r основано на эффекте Доплера. Измерение значения разности частот F_d отраженного от цели и излучаемого РЛС сигнала позволяет определить радиальную скорость ее движения. По-

кажем это. Пусть РЛС излучает непрерывный гармонический сигнал постоянной амплитуды $U_{m \text{ изл}}$ с несущей частотой ω_0 и начальной фазой φ_0 :

$$u_{\text{изл}}(t) = U_{m \text{ изл}} \cos(\omega_0 t + \varphi_0). \quad (6.2)$$

Сигнал, отраженный от цели, удаленной на расстояние D от РЛС, описывается выражением

$$u_{\text{отр}}(t) = U_{m \text{ отр}} \cos \left[\omega_0 \left(t - \frac{2D}{c} \right) + \varphi_0 + \varphi_{\text{отр}} \right], \quad (6.3)$$

где $\varphi_{\text{отр}}$ — изменение начальной фазы сигнала за счет отражения от объекта.

При движении цели с постоянной радиальной скоростью V_p относительно РЛС частота принимаемого сигнала

$$\omega_{\text{отр}} = \frac{d\varphi(t)}{dt} = \omega_0 \left(1 + \frac{2}{c} \frac{dD}{dt} \right) = \omega_0 \pm \omega_0 \frac{2V_p}{c}. \quad (6.4)$$

Частота $\omega_{\text{отр}}$ отличается от частоты излученного сигнала ω_0 на величину

$$\Omega_d = 2\pi F_d = |\omega_{\text{отр}} - \omega_0| = \omega_0 \frac{2V_p}{c}. \quad (6.5)$$

Радиальная скорость движения цели соответственно равна

$$V_p = \frac{\lambda}{2} F_d. \quad (6.6)$$

Из выражения (6.6) следует, что для определения радиальной скорости движения цели необходимо измерить доплеровское приращение частоты F_d .

В заключение отметим, что наряду с координатами цели D_c , φ_c , θ_c и ее радиальной скоростью РЛС позволяют измерять также и их производные.

6.2. Основные характеристики радиолокационных целей

В основу активной и полуактивной радиолокации положено явление отражения (переизлучения) энергии ЭМВ, облучающих объекты. Отражение возникает в тех случаях, когда ЭМВ встречаются на пути своего распространения объекты, электрические параметры (диэлектрическая и магнитная проницаемость или проводимость) которых отличаются от параметров среды распространения. Первичная (падающая) ЭМВ наводит на поверхности объекта токи проводимости (в случае проводника) или токи смещения (в случае диэлектрика). Эти токи являются источником вторичного излучения объектом ЭМВ в различных направлениях. Объект отражает лишь часть падающей энергии. Остальная энергия превращается в тепло. Особый интерес представляет отражение ЭМВ в обратном направлении (в направлении РЛС). Оно

позволяет обнаруживать объекты, не являющиеся источниками собственных электромагнитных излучений, определять их координаты и параметры движения. В общем случае параметры (амплитуда, фаза, частота, поляризация, фазовый фронт) отраженного сигнала в различных направлениях отличаются от параметров зондирующего сигнала. Степень различия определяется отражающими свойствами цели. Указанные свойства зависят от размеров цели, ее конфигурации, электрических параметров материала поверхности, ее шероховатости, длины волны и поляризации ЭМВ, излучаемых РЛС, от направления облучения.

К основным характеристикам радиолокационных целей как отражающих объектов относятся: отражающая способность, законы распределения и спектры флуктуаций амплитуды (мощности) отраженного сигнала.

Отражающая способность определяет способность объекта переизлучать (отражать) большую или меньшую долю падающей на него электромагнитной энергии. В качестве количественного показателя отражающей способности объекта в том или ином направлении применяют так называемую эффективную поверхность σ_c рассеяния (ЭПР) цели, называемую также эффективной отражающей поверхностью (ЭОП). Под эффективной поверхностью рассеяния цели понимают некоторую фиктивную поверхность, которая, будучи помещенной в точку цели, создает у антенны РЛС такую же плотность потока мощности отраженного сигнала, что и реальная цель. При этом предполагается, что данная поверхность является изотропным и не поглощающим энергию переизлучателем.

ЭПР цели в общем случае выражается формулой

$$\sigma_c = 4\pi D_c^2 p_p / p_c, \quad (6.7)$$

где D_c — дальность РЛС — цель; p_p — плотность потока мощности отраженной волны у антенны РЛС; p_c — плотность потока мощности падающей волны у цели.

Входящая в формулу (6.7) плотность потока мощности ЭМВ определяется выражением

$$p = \frac{P}{4\pi D_c^2}, \quad (6.8)$$

где P — мощность излучаемого или отраженного сигнала.

ЭПР является функцией направления облучения цели, т. е. характеризуется пространственной диаграммой вторичного излучения цели по мощности. Обычно ЭПР, представляемую в виде зависимости $\sigma_c = \sigma_c(\varphi, \theta)$, называют диаграммой обратного рассеяния (ДОР).

Аналитическим путем ЭПР может быть рассчитана только для тел сравнительно простой геометрической формы (металлический лист, шар, вибратор).

Реальные цели (летательные аппараты, корабли, танки) имеют сложную конфигурацию, а их отдельные составные элементы могут быть изготовлены из материалов с различными электрическими параметрами. Учесть все факторы, влияющие на параметры сигнала, отраженного от целей, практически невозможно. Их оценка может быть дана только статистическими методами.

Реальная цель как отражающий объект упрощенно может быть представлена совокупностью большого числа независимых отражателей («блестящих» точек), расположенных случайным образом по поверхности объекта. В соответствии с этой физической моделью ЭПР цели будет равна сумме ЭПР i -х отражателей

$$\sigma_{ц} = \sum_{i=1}^N \sigma_i.$$

При всяких изменениях взаимного пространственного положения РЛС и цели, вызванных, например, движением последней, будут изменяться случайным образом расстояния до этих отражателей и их ЭПР, а следовательно, и ЭПР цели.

ЭПР реальной цели — случайная величина, определяемая ее средним значением $\bar{\sigma}_{ц}$. Средние значения ЭПР некоторых целей для сантиметрового диапазона волн приведены в табл. 6.1.

Т а б л и ц а 6.1

ЭПР некоторых реальных целей	
Радиолокационная цель	$\bar{\sigma}_{ц}, \text{м}^2$
Дальний бомбардировщик	10—50
Средний бомбардировщик	5—20
Истребитель	5—8
Крылатая ракета	0,3—0,8

Закон распределения ЭПР таких целей чаще всего является экспоненциальным:

$$w(\sigma_{ц}) = \frac{1}{\bar{\sigma}_{ц}} e^{-\sigma_{ц}/\bar{\sigma}_{ц}}. \quad (6.9)$$

Флюктуации $\sigma_{ц}$ реальных целей вызывают флюктуации амплитуд (огибающих) сигналов, отраженных от них. Закон распределения амплитуд сигналов совпадает с распределением Релея:

$$w(U) = \frac{U}{\sigma_U^2} e^{-U^2/2\sigma_U^2}, \quad (6.10)$$

где σ_U^2 — дисперсия амплитуды отраженного сигнала.

Отражающие свойства целей могут оказывать значительное влияние на эффективность функционирования РЛС — дальность ее действия, точность определения координат и параметров движения целей.

6.3. Методы определения координат и параметров движения объектов

6.3.1. Методы определения дальности до объектов

В зависимости от того, какой из параметров принимаемого радиосигнала используется при измерении времени τ_D , различают амплитудный, частотный и фазовый методы определения дальности.

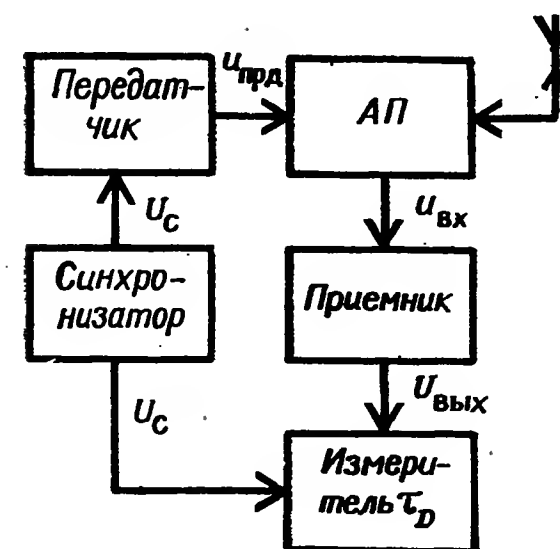


Рис. 6.1. Структурная схема импульсного дальномера

Амплитудные методы основаны на использовании зондирующих сигналов с амплитудной импульсной модуляцией. Сущность импульсного метода заключается в периодическом излучении в направлении лоцируемого объекта радиоимпульсов с малой длительностью $\tau_{и}$ и большим периодом повторения $T_{п}$ и в приеме отраженных от объекта сигналов между очередными посылками радиоимпульсов. Моменты излучения и приема радиоимпульсов на каждом периоде повторения $T_{п}$ фиксируются на временной развертке индикатора РЛС. Поскольку время τ_D пропорционально дальности до объекта, его измерение равносильно измерению дальности до объекта.

Принцип действия дальномера, реализующего импульсный метод, поясняется схемой и графиками, изображенными на рис. 6.1 и 6.2. Импульсы синхронизатора U_c с периодом следования $T_{п}$ запускают передатчик, который генерирует последовательность радиоимпульсов $u_{прд}(t)$ длительностью $\tau_{и}$. Импульсы передатчика подводятся к антенне и излучаются ею в окружающее пространство. Сигналы, отраженные от объекта, принимаются антенной и

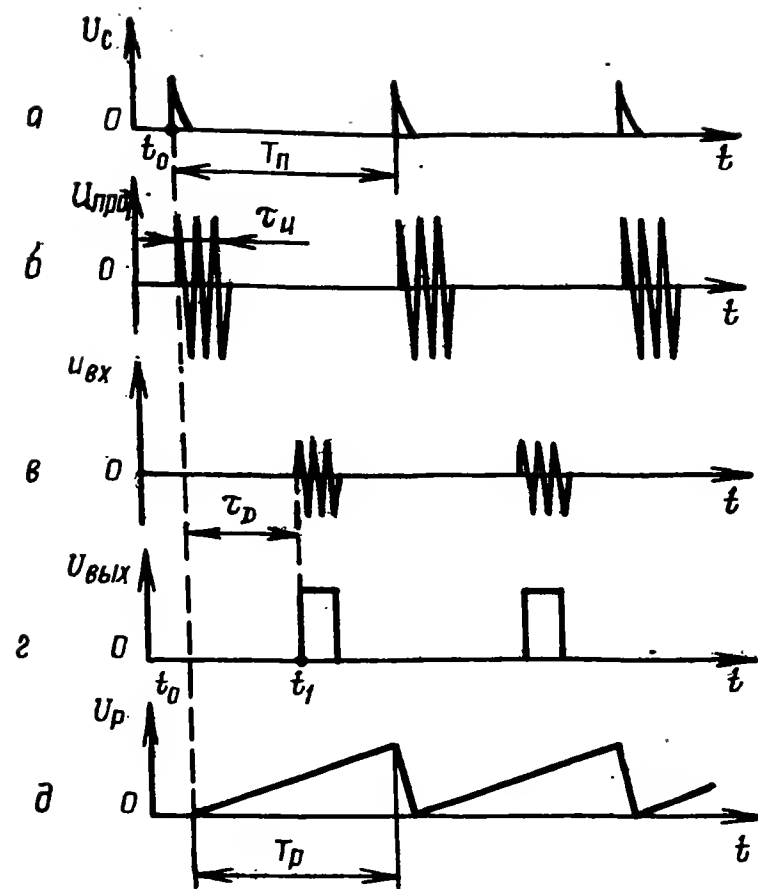


Рис. 6.2. Графики, поясняющие принцип действия импульсного дальномера

поступают на вход приемника. На выходе приемника образуется последовательность видеоимпульсов $U_{\text{вых}}$ с периодом T_n . Время запаздывания каждого принятого радиоимпульса относительно момента излучения зондирующего импульса равно t_D . Видеоимпульсы с выхода приемника подаются на измеритель времени t_D . В качестве измерителей времени t_D используются электронно-лучевые индикаторы, цифровые измерители дальности и системы автоматического слежения по дальности (АСД).

В электронно-лучевых индикаторах могут использоваться электронно-лучевые трубки (ЭЛТ) с амплитудной (рис. 6.3, а) или яркостной отметкой. Запуск развертки индикатора осуществляется импульсами синхронизатора. Таким образом, начало развертки и момент излучения зондирующих импульсов взаимно синхронизированы во времени. Длительность развертки (рис. 6.2, д) выбирается немного меньше периода повторения зондирующих импульсов T_n . Поэтому к моменту излучения следующего импульса передатчика рисующее пятно на экране индикатора успевает возвратиться в исходное положение. Сигналы с выхода приемника подаются на вертикально отклоняющие пластины ЭЛТ. Под действием этих сигналов на ее экране (рис. 6.3, б) формируется амплитудная отметка цели, совпадающая по форме с выходными сигналами приемника. Развертка индикатора гра-

дуируется непосредственно в единицах дальности. Поэтому по положению отметки цели (отраженного сигнала) на развертке ЭЛТ можно определить дальность до цели.

При использовании цифровых измерителей дальность определяется путем счета импульсов на интервале времени t_D , следующих с периодом, существенно меньшим периода T_n . Начало счета задается импульсом синхронизатора, а окончание — выходным сигналом приемника. Данные отсчета запоминаются устройством памяти.

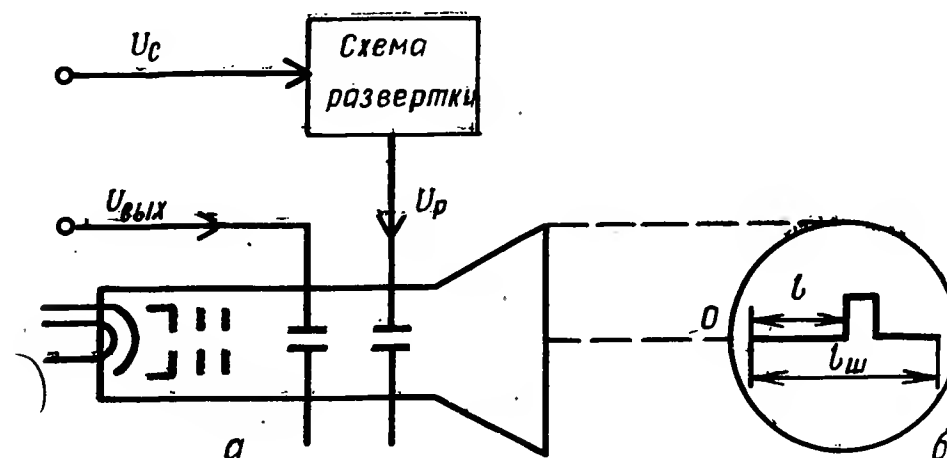


Рис. 6.3. Структурная схема электронного индикатора с амплитудной отметкой (а); изображение на экране ЭЛТ (б)

В системах автоматического сопровождения целей по дальности (АСД) определение дальности осуществляется путем автоматического непрерывного слежения за положением принимаемого сигнала на некотором временном интервале (интервале дальности). Принцип функционирования системы АСД рассматривается ниже.

Импульсный метод измерения дальности позволяет однозначно определять время t_D в пределах от 0 до T_n . При этом диапазон однозначного измерения дальности определяется неравенством

$$0 < D_{\text{ц. одн}} < 0,5 \text{ с } T_n. \quad (6.11)$$

В РЛС с квазинепрерывным излучением (РЛС с малой скважностью) однозначность измерения дальности обеспечивается дополнительным кодированием импульсов, например использованием нескольких частот повторения.

При частотном методе измерения дальности РЛС излучает непрерывные колебания с частотной модуляцией (ЧМ). Дальность до цели определяется путем измерения разностной частоты F_p излучаемого и отраженного сигналов. Упрощенная структурная схема дальномера с ЧМ приведена на рис. 6.4. Графики, поясняющие ее работу, изображены на рис. 6.5.

Передатчик генерирует высокочастотные колебания, частота $f_{\text{изл}}$ которых периодически изменяется по какому-либо закону

(например, по закону симметричной пилы). Закон изменения частоты отраженного сигнала тот же, что и излучаемого, но смещен по оси времени на время τ_D . Принятые и излучаемые колебания подаются на смеситель приемника, на выходе которого образуется колебание разностной частоты F_p . После усиления и фильтрации колебание с частотой F_p (рис. 6.5, б) подводится к измерителю частоты.

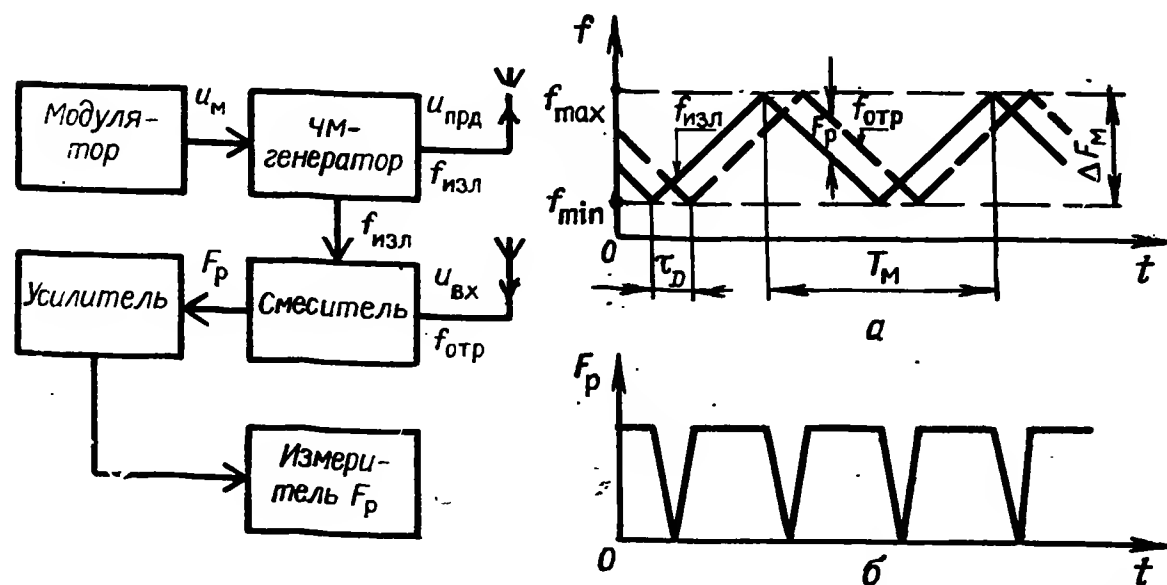


Рис. 6.4. Структурная схема дальномера с частотной модуляцией

Рис. 6.5. Графики, поясняющие принцип действия дальномера с ЧМ

Передатчик дальномера с ЧМ состоит из модулятора и ЧМ-генератора. Модулятор вырабатывает напряжение, под действием которого изменяется частота выходных колебаний генератора по заданному закону. Отсчет дальности может производиться по цифровому или электронному индикатору.

В фазовых дальномерах используется фазовый метод измерения дальности, при котором время τ_D определяется разностью фаз излучаемых и принимаемых сигналов.

6.3.2. Методы определения угловых координат объектов

Принцип определения угловых координат (пеленгации) целей основан на измерении направления прихода ЭМВ, излучаемых или отражаемых объектом. В состав угломерного устройства входят пеленгационное и исполнительное устройства. Пеленгационное устройство состоит из антенны, приемника и измерителя. На выходе пеленгационного устройства образуется напряжение, пропорциональное угловым координатам цели. Исполнительное устройство применяется в системах автоматического слежения по направлению (АСН). Оно осуществляет доворот антенны РЛС

так, что в установившемся режиме направление ее геометрической оси совпадает с направлением на цель.

Основными характеристиками пеленгационного устройства являются пеленгационная характеристика и пеленгационная чувствительность. Пеленгационной характеристикой называется зависимость выходного напряжения пеленгатора от направления прихода ЭМВ, т. е. функция $U_{\text{пв}}(\varphi)$. Пеленгационная чувствительность определяет крутизну пеленгационной характеристики в направлении, примерно совпадающем с направлением на цель.

Методы измерения угловых координат подразделяются на амплитудные, фазовые и частотные в зависимости от параметра отраженного сигнала, используемого при измерении угловых координат.

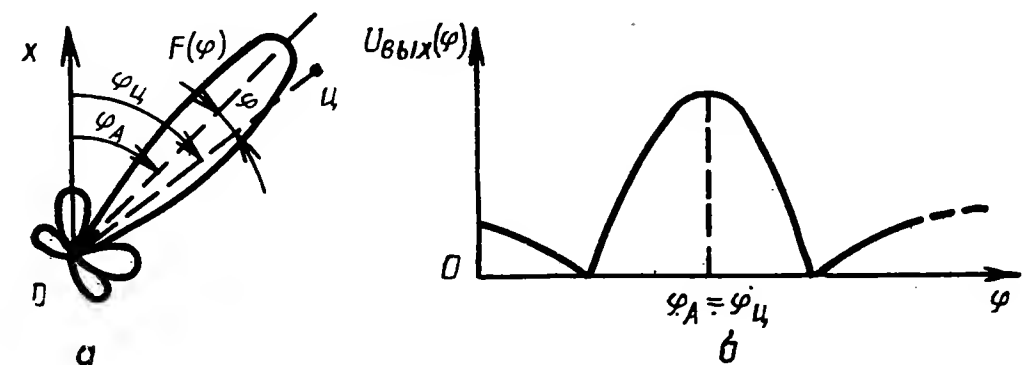


Рис. 6.6. Форма диаграммы направленности антенны при пеленгации цели методом максимума (а); закон изменения напряжения на выходе приемника (б)

Амплитудные методы пеленгации основаны на использовании направленных антенн. Они характеризуются тем, что определение угловой координаты связано с оценкой амплитуды сигнала на выходе приемной антенны. Среди амплитудных методов пеленгации находят применение метод максимума, метод минимума и метод равнотендерного направления.

При пеленгации по методу максимума используется антенна (рис. 6.6, а) с узкой диаграммой направленности (доли, единицы градусов). Схема угломерного устройства с пеленгацией по методу максимума показана на рис. 6.7.

При вращении антенны амплитуда сигналов на ее выходе изменяется в соответствии с формой ДНА. Амплитуда сигналов на выходе приемника $U_{\text{вых}}(\varphi)$ также повторяет форму ДНА (рис. 6.6, б). Измерительное устройство содержит измеритель амплитуды выходного напряжения приемника и указатель положения антенны. Измерение угловых координат цели производится при положении ДНА, соответствующем максимальному значению напряжения на выходе приемника. Достоинствами метода являются простота его технической реализации и возможность получения наибольшего значения амплитуды сигнала в момент отсче-

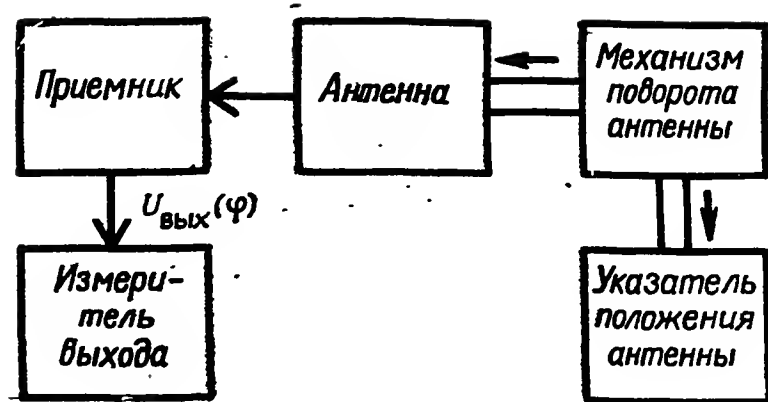


Рис. 6.7. Структурная схема угломерного устройства с пеленгацией по методу максимума

та угловых координат. Недостатком метода является низкая точность, так как пеленгационная чувствительность вблизи максимума ДНА низкая.

При пеленгации по методу минимума используется антенна с явно выраженным минимумом ДНА. Схема угломерного устройства не отличается от рассмотренной выше. Отсчет угловой координаты производится при положении ДНА, соответствующем минимальному значению напряжения на выходе приемника. Преимуществом метода является более высокая точность измерения угловой координаты по сравнению с методом максимума, так как пеленгационная чувствительность угломерного устройства в окрестности точки отсчета высокая. Существенным недостатком метода является минимальное значение величины амплитуды сигнала в момент отсчета.

Метод равносигнального направления подразумевает сравнение амплитуд сигналов, принимаемых либо одной антенной при различных пространственных положениях ее ДНА, либо несколькими антеннами, максимумы диаграмм направленности которых отклонены друг от друга на некоторый угол $2\varphi_0$ (рис. 6.8, а).

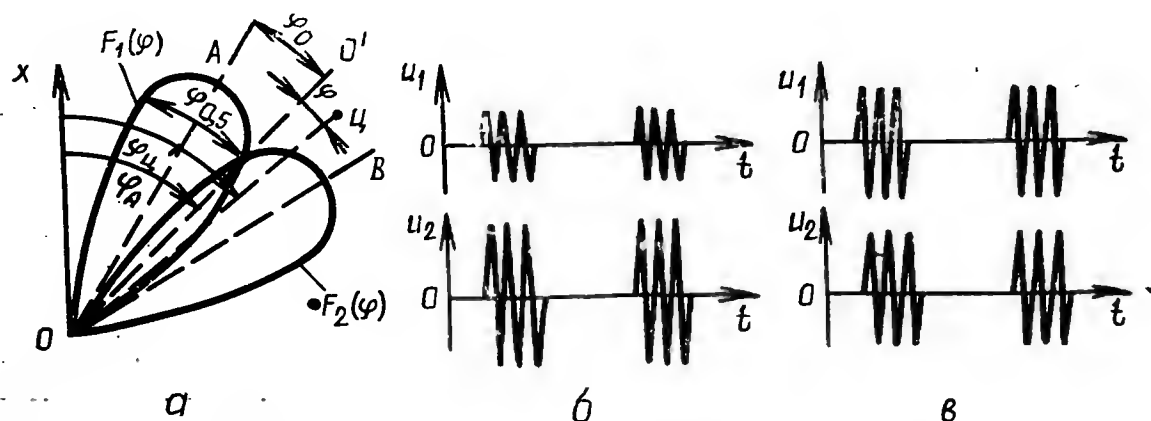


Рис. 6.8. К пояснению моноимпульсного метода пеленгации целей: диаграмма направленности антенной системы (а); графики напряжений на выходах облучателей при $\varphi \neq 0$ (б) и $\varphi = 0$ (в)

При использовании нескольких антенн обработка принятых сигналов осуществляется одновременно. При излучении импульсных сигналов угловые координаты цели можно получить за время действия одного принимаемого импульса. Такие угломерные устройства называют моноимпульсными. Для пеленгации цели в одной плоскости достаточно иметь две антенны. При пеленгации цели в обеих плоскостях используются четыре антенны. Пересекаясь, ДНА образуют так называемое равносигнальное направление (РСН) OO' . Если цель не находится на равносигнальном направлении, то амплитуда сигнала на выходе U_1 одного из приемников будет больше, чем на другом U_2 (рис. 6.8, б). Сигналы U_1 и U_2 будут равны, если цель находится на РСН. Пеленг цели определяется по положению ДНА в момент равенства амплитуд сравниваемых сигналов. В этом случае

$$\varphi_A = \varphi_D; \quad \varphi = \varphi_D - \varphi_A = 0.$$

В простейшей амплитудной моноимпульсной РЛС напряжения U_1 и U_2 с выходов приемников сравниваются по амплитуде в схеме вычитания. При этом выходное напряжение $U_{\text{вых}} = U_1 - U_2$ равно нулю, если цель находится на РСН, и отличается от нуля, если цель отклонена от РСН. Знак напряжения $U_{\text{вых}}$ определяет сторону отклонения направления на цель от РСН (OO').

Достоинством моноимпульсного метода является то, что положение РСН не изменяется при флуктуациях амплитуды принимаемых сигналов, так как в любом случае разность одновременно флуктуирующих сигналов равна нулю.

При использовании одной антенны РСН может быть образовано в результате конического сканирования ДНА. Максимум ДНА, перемещаясь в пространстве, описывает конус. РСН является осью конуса OO' (рис. 6.9, а). Этот метод позволяет определить азимут и угол места цели по положению ДНА в тот момент времени, когда цель находится на РСН. В этом случае амплитуда импульсов на выходе приемника постоянна и не зависит от времени (рис. 6.9, б). Если цель отклонится от оси OO' на угол φ , амплитуда принимаемых сигналов будет изменяться с частотой сканирования диаграммы направленности антенны $\Omega_{\text{ск}}$ (рис. 6.9, в). Амплитуда огибающей (коэффициент амплитудной модуляции) радиоимпульсов при малых φ будет пропорциональна величине отклонения направления РЛС — цель (углу φ) от РСН, а фаза огибающей (угол φ_c) зависит от стороны отклонения цели от РСН.

Фазовые методы пеленгации основаны на сравнении фаз сигналов, принимаемых несколькими антеннами, разнесенными в пространстве. Схема простейшего моноимпульсного пеленгационного устройства представлена на рис. 6.10. Сигналы $u_1(t)$ и $u_2(t)$, принимаемые антеннами A_1 и A_2 , при несовпадении направления на цель с РСН будут иметь сдвиг по фазе, обусловленный

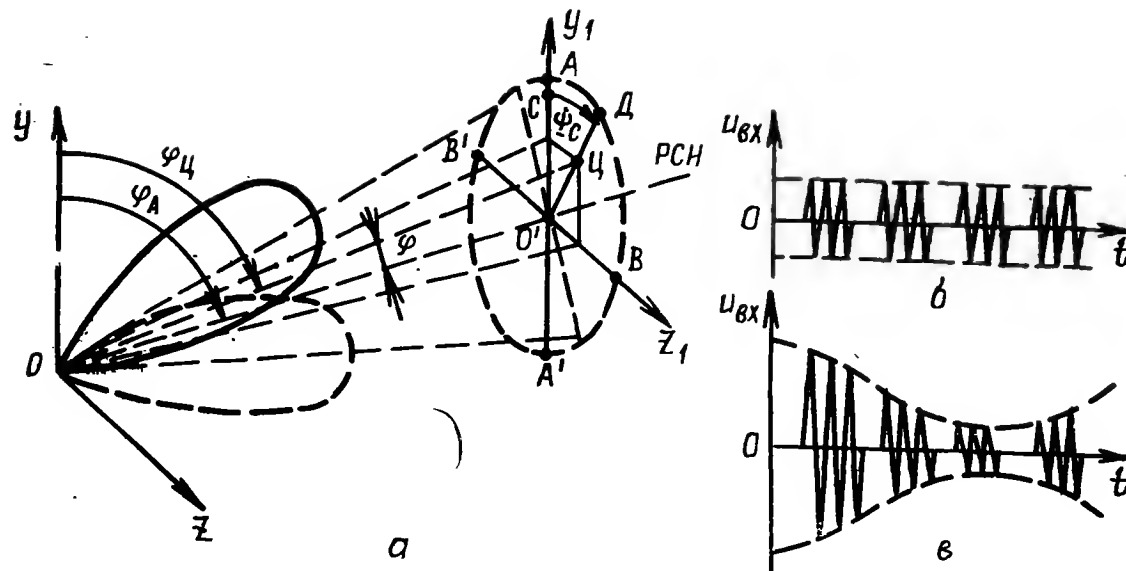


Рис. 6.9. К пояснению принципа пеленгации целей методом конического сканирования диаграммы направленности антенны (а); графики напряжений на выходе приемника при $\varphi=0$ (б) и $\varphi \neq 0$ (в)

различием длин путей распространения ЭМВ от источника излучения (Ц) до антенн A_1 и A_2 :

$$\Delta\psi = \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \varphi, \quad (6.12)$$

где d — расстояние между антеннами, называемое базой; λ — длина волны.

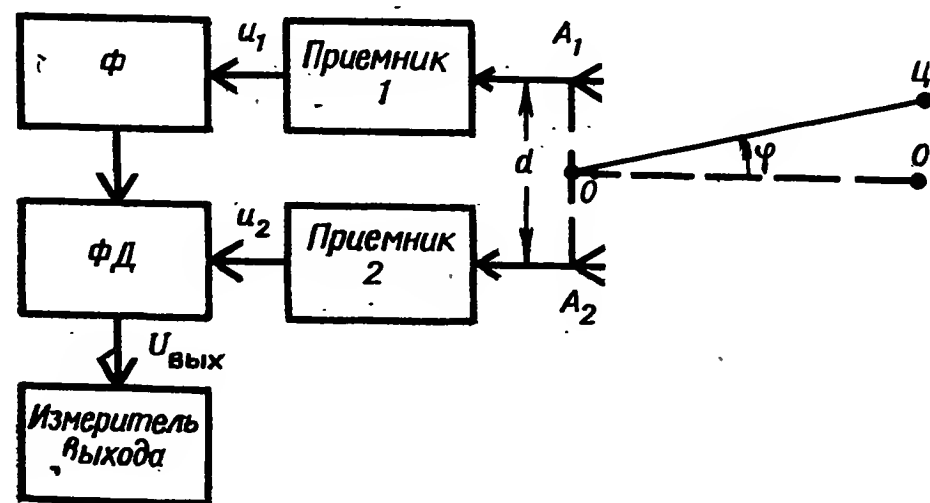


Рис. 6.10. Структурная схема фазового пеленгатора

Принятые сигналы $u_1(t)$ и $u_2(t)$ после усиления и нормировки по амплитуде в приемниках 1 и 2 поступают на фазовый детектор (ФД). В одном из каналов перед фазовым детектором уста-

новлен фазовращатель (ФВ), изменяющий фазу напряжения u_1 на 90° . Напряжение на выходе фазового детектора

$$U_{\text{вых}}(\varphi) = k \sin \left(\frac{2\pi d}{\lambda} \sin \varphi \right), \quad (6.13)$$

где k — коэффициент пропорциональности.

При малых значениях φ ($< 10^\circ$)

$$U_{\text{вых}}(\varphi) \approx k \sin \frac{2\pi d}{\lambda} \varphi. \quad (6.14)$$

При изменении φ в широких пределах пеленгационная характеристика фазового пеленгационного устройства неоднозначна. Неоднозначность измерения угловой координаты устраняется применением направленных антенн.

В угломерном устройстве с фазовым методом пеленгация цели осуществляется по равнофазному направлению (РФН) в тот момент времени, когда фазовый сдвиг принимаемых сигналов равен нулю. Основной недостаток данного устройства состоит в том, что неидентичность фазовых характеристик приемных каналов приводит к ошибкам пеленгации.

6.3.3. Методы определения скорости движения объектов

Скорость движения цели $V_{\text{ц}}$ относительно РЛС можно определить через радиальную V_r и тангенциальную V_t составляющие (радиальная составляющая направлена по линии РЛС — цель, а тангенциальная — перпендикулярно ей):

$$V_{\text{ц}} = \sqrt{V_r^2 + V_t^2}. \quad (6.15)$$

Измерение V_r часто основывается на использовании эффекта Доплера. Принцип действия таких измерителей сводится к определению разности доплеровских приращений частот зондирующего и отраженного сигналов, обусловленной движением источника излучения (РЛС) и лоцируемого объекта.

Принцип действия измерителя V_r при использовании непрерывных сигналов в случае неподвижной РЛС поясняется схемой, изображенной на рис. 6.11.

Передатчик генерирует гармонические колебания с частотой ω_0 , которые излучаются антенной A_1 . Сигналы, отраженные от цели, принимаются антенной A_2 . Принимаемые сигналы имеют частоту колебаний, отличающуюся от частоты зондирующего сигнала на величину $\Omega_d = 2V_r/\lambda$. Излучаемые и принимаемые сигналы подаются на смеситель. На выходе смесителя образуются колебания разностной частоты, равной по величине доплеровскому приращению частоты Ω_d принимаемого сигнала. После усиления и фильтрации с помощью фильтра доплеровских частот (ФДЧ) колебания подводятся к измерителю частоты. Измерен-

ное значение частоты однозначно определяет V_r . Измерение F_d может производиться по стрелочному прибору, цифровому или электронному индикатору либо с помощью системы автоматиче-

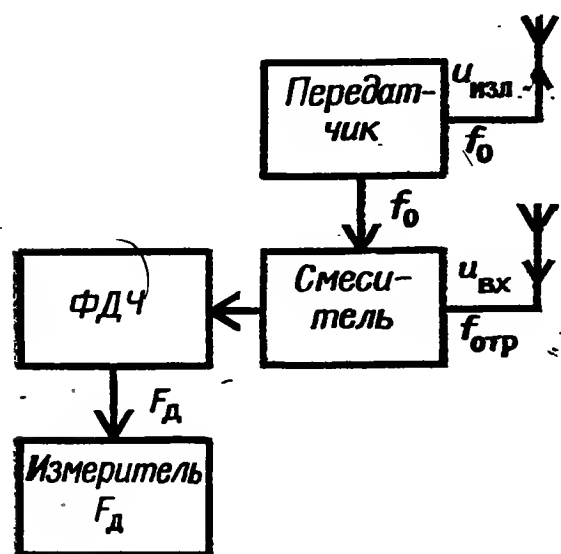


Рис. 6.11. Структурная схема измерителя радиальной скорости движения цели

ского слежения по скорости (АСС). Принцип функционирования систем АСС РЛС с непрерывным излучением будет рассмотрен в параграфе 6.13.

6.4. Основные тактико-технические данные РЛС

РЛС любого назначения характеризуются тактическими и техническими данными.

К основным тактическим данным относятся: зона обзора, период (время) обзора, измеряемые координаты и их производные, точность измерения координат и их производных, разрешающая способность, помехозащищенность.

Зона обзора РЛС определяется областью пространства, в пределах которой осуществляется обнаружение целей, измерение координат и их производных с заданной вероятностью и точностью. Зона обзора по дальности ограничивается максимальной D_{\max} и минимальной D_{\min} дальностями действия РЛС, а по угловым координатам — секторами обзора по азимуту $\Phi_{\text{аз}}$ и углу места $\Phi_{\text{ум}}$. Минимальная дальность определяется временным интервалом, в пределах которого РЛС после излучения зондирующего сигнала не способна принимать сигналы, отраженные от цели. Максимальная дальность определяется наибольшим удалением цели от РЛС, на котором обеспечивается обнаружение цели с заданной вероятностью. Максимальная дальность действия зависит от характеристик цели. Сектора обзора РЛС по азимуту и углу места определяются тактическим назначением. Если сектор обзора РЛС по азимуту равен 360° , то она называется РЛС кругового обзора.

Период (время) обзора — время, в течение которого осуществляется однократный обзор заданной области простран-

ства (зоны обзора). Из тактических соображений это время должно быть малым. Вместе с тем для получения большого отношения сигнал/шум цель должна облучаться сравнительно долго. Практически время обзора составляет единицы или десятки секунд.

Измеряемыми координатами и их производными во времени являются: дальность, угловые координаты ($\Phi_{\text{аз}}$ и $\Phi_{\text{ум}}$), высота, скорость, а также угловые скорости перемещения в горизонтальной и в вертикальной плоскости.

Точность измерения координат и их производных во времени характеризуется величиной ошибок измеренных значений. При оценке точности измерений обычно учитываются лишь случайные составляющие ошибок, которые характеризуются математическим ожиданием и дисперсией.

Потенциальная точность измерения дальности при действии на входе приемника белого шума и использовании полезных сигналов любого вида определяется выражением

$$\sigma_{Dп} = \frac{c}{2\Delta f_s \sqrt{q}}, \quad (6.16)$$

где Δf_s — эффективная ширина спектра сигнала; $q = 2E_s/N_0$ — удвоенное отношение энергии сигнала (за время накопления) к спектральной плотности шума на входе приемника.

Потенциальная точность измерения угловых координат в обзорных РЛС при аппроксимации огибающей выходного сигнала (ДНА) гауссовой кривой

$$\sigma_{\varphi п} = \frac{\varphi_{0,5}}{\sqrt{\pi q}}, \quad (6.17)$$

где $\varphi_{0,5}$ — ширина ДНА по уровню половинной мощности.

Потенциальная точность измерения радиальной скорости

$$\sigma_{Vп} = \frac{\lambda \Delta f_s}{2 \sqrt{\pi q}}. \quad (6.18)$$

Разрешающая способность РЛС характеризует возможность одновременного раздельного наблюдения нескольких целей, координаты или производные которых отличаются. Разрешающая способность по параметру α определяется минимальным различием параметра $\delta\alpha = |\alpha_1 - \alpha_2|$ двух целей, при котором обеспечивается обнаружение обеих целей с заданными вероятностями $W_{\text{по}}$ и $W_{\text{лт}}$ или измерение их координат с заданной точностью.

В зависимости от параметра α цели могут разрешаться по дальности, угловым координатам и скорости. Чем меньше $\delta\alpha$, тем выше разрешающая способность РЛС по параметру α .

Потенциальная разрешающая способность по дальности определяется формулой

$$\delta_{Dп} = \frac{c}{2\Delta f_s}. \quad (6.19)$$

Для радиоимпульсов прямоугольной формы без внутриимпульсной модуляции

$$\delta_{Dn} = \frac{c}{2\Delta f_s} = \frac{c\tau_n}{2}. \quad (6.20)$$

Потенциальная разрешающая способность РЛС по угловым координатам приближенно равна ширине ДНА по уровню половинной мощности:

$$\delta_{\varphi n} = \Phi_{0,5}. \quad (6.21)$$

Потенциальная разрешающая способность по радиальной скорости определяется выражением

$$\delta_{Vn} = \frac{\lambda \Delta f_s}{2}. \quad (6.22)$$

Помехозащищенностью называется способность РЛС противостоять разведке ее параметров и выполнять свои функции в условиях воздействия помех. Из двух РЛС считается более помехозащищенной та, у которой при прочих равных условиях воздействие помех вызывает меньшее снижение ее тактических показателей. Защита РЛС от воздействия помех осуществляется одновременным применением различных технических решений и организационных мероприятий.

К техническим характеристикам РЛС относятся: вид и параметры зондирующих сигналов, способы обработки сигналов и отображения обнаруженных целей и их координат, длина волны излучаемых сигналов, мощность излучаемого сигнала, форма и ширина ДНА, коэффициент усиления антенны, время облучения точечной цели, чувствительность приемника.

Вид и параметры зондирующих сигналов определяют разрешающую способность, точность измерения дальности и радиальной скорости. По виду зондирующих сигналов РЛС разделяются на импульсные, непрерывные и квазинепрерывные. У импульсных РЛС скважность излучаемых импульсов составляет сотни и тысячи, в РЛС с квазинепрерывным излучением — 5—30. Сигналы импульсных РЛС могут быть некогерентными и когерентными, без внутриимпульсной модуляции (так называемые простые сигналы) и с внутриимпульсной частотной или фазовой модуляцией (сложные сигналы). Некогерентная последовательность радиоимпульсов характеризуется тем, что начальные фазы каждого импульса независимы и изменяются от импульса к импульсу по случайному закону. У когерентной последовательности начальные фазы импульсов последовательности постоянны или изменяются по детерминированному закону. Для простых импульсных сигналов произведение ширины спектра на длительность импульсов или так называемая база $B = \Delta f_s \tau_n = 1$, у сложных — $B \gg 1$. Это означает, что использование сложных импульсных сигналов позволяет улучшить разрешающую способность РЛС по дальности по сравнению с простыми той же дли-

тельности в B раз. В РЛС с непрерывным излучением используются немодулированные (гармонические) и модулированные сигналы с амплитудной, частотной и фазовой модуляцией, а также шумоподобные сигналы. В импульсных РЛС возможно разрешение (селекция) целей по дальности, а в РЛС с непрерывным и квазинепрерывным излучением — по скорости.

По способу обработки радиолокационной информации различают первичную, вторичную и третичную обработку. Первичная обработка при обзоре осуществляется за время облучения цели, при вторичной — обрабатывается информация за несколько периодов (при обзоре) или сглаживанием измеренных данных (при слежении). Она позволяет существенно увеличить отношение сигнал/шум, улучшить показатели обнаружения цели, точность измерения координат, определить траекторию движения целей. Вторичная обработка информации производится, как правило, с помощью ЦВМ, в которые вводятся данные отдельных дискретных измерений. В режиме слежения вторичная обработка повышает точность слежения за целями.

Третичная обработка при обзоре предусматривает совместную обработку информации о целях, получаемую с помощью нескольких РЛС. При обзоре она позволяет, например, определить местоположение источников помех, а в режиме слежения повышает точность и помехозащищенность следящих систем.

Длина волны выбирается с учетом особенностей распространения ЭМВ того или иного диапазона. Она определяет размеры антенны, ширину ее диаграммы направленности и коэффициент усиления, точность и разрешающую способность по скорости и угловым координатам. Широкое применение в радиолокации нашли дециметровые и сантиметровые волны. На этих длинах волн возможно получение узких ДНА при небольших габаритах антенн.

Мощность излучаемого сигнала P_p определяется главным образом требуемой дальностью действия РЛС. Мощность РЛС с непрерывным излучением — от долей ватта до десятков киловатт, импульсных РЛС — до десятков мегаватт в импульсе. Применительно к импульсным РЛС имеют в виду импульсную мощность P_n (пиковую мощность в импульсе) или среднюю мощность P_{cp} за период повторения импульсов T_n . Средняя и импульсная мощность импульсных сигналов прямоугольной формы связана соотношением $P_n = Q P_{cp}$.

Параметры антенны определяются назначением РЛС. При этом широко используются антенны с узкой диаграммой направленности в одной или обеих плоскостях. Ширина ДНА определяет потенциальную разрешающую способность РЛС по угловым координатам.

Важной технической характеристикой РЛС является метод обзора пространства. Различают одновременный, последовательный и смешанный виды обзора. При одновременном обзоре телесный угол зоны обзора перекрывается несколькими неподвиж-

ными лучами. Координаты целей определяются в пределах всей зоны одновременно. Последовательный обзор осуществляется одним лучом, перемещающимся в пространстве в пределах зоны обзора по заданной программе. При смешанном обзоре используется комбинация последовательного и одновременного обзоров. Если используется плоский луч, могут применяться круговой и секторный виды обзора. Круговой обзор осуществляется путем вращения диаграммы направленности антенны относительно вертикальной оси вкруговую (на 360°). При секторном обзоре диаграмма направленности перемещается в пределах заданного сектора $\Phi_{аз}$.

Время облучения точечной цели при обзоре — это время, в течение которого цель находится в пределах ширины ДНА РЛС за один период (цикл) обзора:

$$T_{обл} = \Phi_{0,5} / \Omega_a, \quad (6.23)$$

где Ω_a — угловая скорость перемещения диаграммы направленности антенны.

Время облучения определяет энергию полезных сигналов за один период обзора.

Чувствительность приемника РЛС — минимальная мощность $P_{пр min}$ входного сигнала, при которой обеспечивается обнаружение сигнала и измерение его параметров с заданными показателями. Реальная чувствительность приемников РЛС составляет $1 \cdot 10^{-12} — 1 \cdot 10^{-16}$ Вт.

6.5. Максимальная дальность действия РЛС

Максимальной дальностью действия РЛС называется наибольшее удаление цели от РЛС, при котором сигналы, отраженные от цели, обнаруживаются с заданными вероятностями $W_{по}$ правильного обнаружения и ложной тревоги $W_{лт}$. Найдем выражение для максимальной дальности действия РЛС в свободном пространстве.

Предположим, что цель с ЭПР $\sigma_{ц}$ находится на расстоянии $D_{ц}$ от РЛС. Мощность сигнала, излучаемого РЛС, равна P_p . Плотность потока мощности сигнала у цели

$$p_{ц} = \frac{P_p}{4\pi D_{ц}^2} G_p(\varphi_{ц}, \theta_{ц}), \quad (6.24)$$

где G_p — коэффициент усиления антенны РЛС в направлении РЛС — цель.

Цель переизлучает всю падающую на нее мощность изотропно и создает плотность мощности отраженного сигнала у антенны РЛС

$$p_p = \frac{P_{ц}}{4\pi D_{ц}^2} = \frac{p_{ц}\sigma_{ц}}{4\pi D_{ц}^2}. \quad (6.25)$$

Мощность сигнала на входе приемника РЛС

$$P_{пр} = p_p A_p(\varphi_{ц}, \theta_{ц}) = \frac{P_p G_p(\varphi_{ц}, \theta_{ц}) \sigma_{ц} A_p(\varphi_{ц}, \theta_{ц})}{(4\pi)^2 D_{ц}^4}, \quad (6.26)$$

где $A_p(\varphi_{ц}, \theta_{ц})$ — эффективная площадь антенны РЛС в направлении РЛС — цель.

Из выражения (6.26) находим, что

$$D_{ц} = \sqrt[4]{\frac{P_p G_p(\varphi_{ц}, \theta_{ц}) \sigma_{ц} A_p(\varphi_{ц}, \theta_{ц})}{(4\pi)^2 P_{пр}}}.$$

По мере увеличения дальности до цели мощность отраженных сигналов на входе приемника уменьшается. При некоторой предельной (максимальной) дальности $D_{ц max}$ отраженный сигнал становится малым и маскируется внутренними шумами приемника. Цель будет обнаруживаться с некоторыми значениями вероятностей $W_{по}$ и $W_{лт}$. Минимальный уровень мощности принимаемого сигнала определяется чувствительностью приемника $P_{пр min}$. Следовательно, максимальная дальность РЛС

$$D_{ц max} = \sqrt[4]{\frac{P_p G_p(\varphi_{ц}, \theta_{ц}) \sigma_{ц} A_p(\varphi_{ц}, \theta_{ц})}{(4\pi)^2 P_{пр min}}}. \quad (6.27)$$

Если учесть, что

$$A_p(\varphi, \theta) = \frac{\lambda^2}{4\pi} G_p(\varphi, \theta) = \frac{\lambda^2}{4\pi} G_{mp} F_p^2(\varphi, \theta)$$

и то, что обнаружение отраженных сигналов производится в окрестности максимума ДНА РЛС [$F_p^2(\varphi, \theta) \approx 1$], выражение для $D_{ц max}$ будет иметь вид

$$D_{ц max} = \sqrt[4]{\frac{P_p G_{mp}^2 \sigma_{ц} \lambda^2}{(4\pi)^3 P_{пр min}}}. \quad (6.28)$$

Из выражения (6.28) следует, что максимальная дальность действия РЛС определяется мощностью (энергией излучаемых сигналов) и не зависит от их формы. Увеличение дальности действия возможно за счет повышения направленности излучения и приема антенны РЛС (увеличения коэффициента усиления антенны G_{mp}).

Б. РАДИОЛОКАЦИОННОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ ОБЪЕКТОВ

6.6. Характеристики обнаружения радиолокационных сигналов

Как уже отмечалось, при активной радиолокации полезная информация о цели содержится в сигнале, отраженном от нее. Наряду с отраженным (полезным) сигналом на входе приемника РЛС действуют и помеховые сигналы (помехи). К последним относятся внутренние шумы приемника, мешающие отражения (от

земной или водной поверхности, гидрометеоров, различных наземных сооружений и т. д.), взаимные помехи, возникающие при работе других РЛС и, наконец, организованные помехи (помехи, создаваемые противником преднамеренно). Все перечисленные помехи, действующие на радиолокационный приемник, носят случайный характер. Случайным событием для получателя радиолокационной информации является и появление цели с теми или иными координатами.

Радиолокационное обнаружение — это процесс принятия решения о наличии или отсутствии полезного сигнала (цели) с заданными вероятностями правильного обнаружения и ложной тревоги $W_{по}$ и $W_{лт}$. При отсутствии помех на входе приемника проблемы в принятии решения в принципе не возникает. Действительно, отсутствие напряжения на выходе приемника или его наличие однозначно свидетельствует об отсутствии или наличии сигнала, отраженного от цели. Иначе обстоит дело при наличии помех или амплитудных флюктуаций отраженного сигнала: полезный сигнал может оказаться замаскированным или подавленным помехами, а при его отсутствии выбросы помехового сигнала могут быть приняты за полезный сигнал. В связи с этим радиолокационное обнаружение носит статистический характер. Другими словами, решение о наличии или отсутствии цели не является абсолютно достоверным: оно принимается с той или иной вероятностью ошибки. Величина вероятности ошибки характеризует качество обнаружения.

Из всех возможных совокупностей полезных сигналов и помех, действующих на входе приемника РЛС, далее будет рассматриваться аддитивная смесь полезного сигнала и нормального белого шума. Теория обнаружения наилучшим образом разработана именно для этого случая.

Напряжение, действующее на входе приемника:

$$u_{вх}(t) = \lambda u_c(t) + u_{ш}(t), \quad (6.29)$$

где λ — параметр, принимающий значения 1 или 0 (наличие или отсутствие полезного сигнала на входе приемника).

Априорные (предшествующие обнаружению) вероятности наличия ($\lambda=1$) и отсутствия ($\lambda=0$) полезного сигнала соответственно равны $W_{ц}$ и W_0 .

Для импульсной РЛС радиолокационный сигнал на входе приемника длительностью $\tau_{и}$ может быть записан в виде

$$u_c(t) = U_{т\ вх} \cos(\omega_c t + \varphi_0), \quad (6.30)$$

где $t_1 \leq t \leq t_1 + \tau_{и}$.

Он характеризуется моментом появления t_1 , амплитудой $U_{т\ вх}$, частотой ω_c и начальной фазой φ_0 . Перечисленные параметры сигнала в общем случае являются функциями времени, в том числе и случайными.

Если полезный сигнал на входе приемника имеется, то при наличии шума могут быть приняты два решения: «сигнал есть»

(это решение называется правильным обнаружением цели и характеризуется вероятностью $W_{до}$) и «сигнал отсутствует» (решение об отсутствии сигнала называется пропуском цели и характеризуется вероятностью $W_{пр}$). Указанные события составляют полную группу несовместных событий, т. е. $W_{до} + W_{пр} = 1$.

Если полезного сигнала на входе приемника нет, могут быть приняты также два решения: «сигнал отсутствует» (это решение называется правильным необнаружением, ему соответствует вероятность $W_{пно}$) и «сигнал есть» (решение о наличии цели называется ложной тревогой, ему соответствует вероятность $W_{лт}$). Данные события составляют также полную группу несовместных событий, т. е. $W_{пно} + W_{лт} = 1$.

Из четырех рассмотренных условных вероятностей независимыми являются две. В качестве независимых вероятностей обычно выбирают $W_{по}$ и $W_{лт}$.

Особенностью радиолокационного обнаружения является отсутствие достоверных сведений (априорной информации) о наличии цели в заданной области пространства. Поэтому полагают априорные вероятности $W_{ц} = W_0 = 0,5$.

Качество обнаружения целей тем выше, чем больше $W_{по}$ и меньше $W_{лт}$. Количественная оценка качества обнаружения может быть дана с помощью так называемых характеристик обнаружения, представляющих собой зависимость $W_{по}$ от $W_{лт}$ при фиксированном параметре $q = 2E_c/N_0$. Здесь E_c — энергия сигнала, N_0 — спектральная плотность шума на входе приемника РЛС. Размерность N_0 совпадает с размерностью E_c . Поэтому q называют удвоенным отношением сигнал/шум по энергии. Вид характеристик обнаружения показан на рис. 6.12. Из рисунка видно, что каждому значению q соответствует вполне определенная кривая $W_{по} = f(W_{лт})$, а каждой паре $W_{по}$ и $W_{лт}$ — определенное значение q . С увеличением q возрастает $W_{по}$ (при $W_{лт} = \text{const}$) либо уменьшается $W_{лт}$ (при $W_{по} = \text{const}$). Чем больше q , тем выше располагается соответствующая кривая обнаружения.

Процесс обнаружения сигналов заключается в сравнении выходного напряжения $U_{вых}$ приемника с некоторым установленным

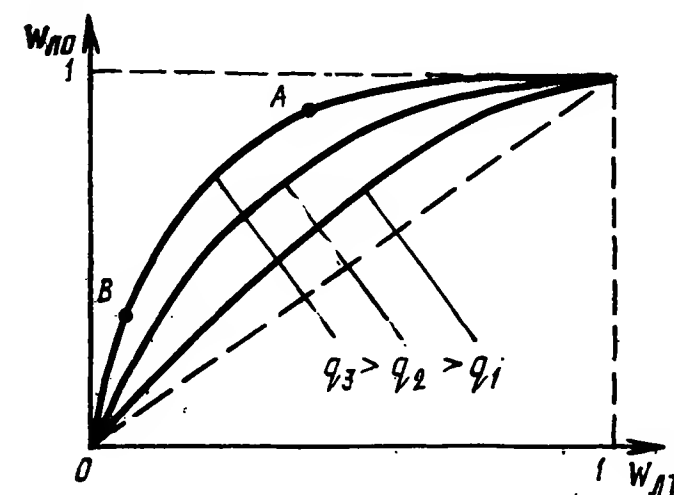


Рис. 6.12. Характеристики обнаружения радиолокационных приемников

уровнем $U_{\text{пор}}$. При $U_{\text{вых}} \geq U_{\text{пор}}$ принимается решение о наличии цели, а при $U_{\text{вых}} < U_{\text{пор}}$ — о ее отсутствии.

Изменение $U_{\text{пор}}$ (при заданном q) приводит к изменению величин $W_{\text{по}}$ и $W_{\text{лт}}$, т. е. к перемещению рабочей точки по характеристике обнаружения. Так, при увеличении $U_{\text{пор}}$ рабочая точка смещается справа вниз налево ($U_{\text{пор. А}} < U_{\text{пор. Б}}$).

Обычно считается, что РЛС выполняет свои функции, если $W_{\text{по}} = 0,8 \div 0,9$ и $W_{\text{лт}} = 1 \cdot 10^{-5}$.

6.7. Структурные схемы приемников РЛС

Качество радиолокационного обнаружения, характеризующее тем или иным количественным показателем, в значительной степени зависит от структуры системы совместной обработки смеси полезного сигнала и помехи, в том числе от структуры приемника РЛС. Естественным поэтому является стремление использовать приемники, структуры которых оптимальны с точки зрения тех или иных критериев. Реализация оптимальных приемных устройств обычно сложна. В связи с этим на практике применяются более простые структуры, так называемые квазиоптимальные, показатели качества которых незначительно отличаются от оптимальных.

Одними из возможных критериев оптимальности приемников обнаружения являются критерий идеального наблюдения и критерий Неймана — Пирсона.

В соответствии с критерием идеального наблюдения оптимальный приемник при действии на его входе аддитивной смеси нормального белого шума и полезного сигнала обеспечивает принятие решения об обнаружении сигнала (цели) с минимальной суммарной вероятностью ошибки:

$$W_{\text{ош}} = W_{\text{д}} W_{\text{пр}} + W_{\text{о}} W_{\text{лт}}. \quad (6.31)$$

Для любого другого приемника, неоптимального по этому критерию, при прочих равных условиях $W_{\text{ош}}$ будет больше.

В радиолокации широко используется критерий Неймана — Пирсона. В соответствии с этим критерием оптимальный приемник (при той же смеси сигнала и помехи) максимизирует вероятность $W_{\text{по}}$ при заданном (фиксированном) значении вероятности $W_{\text{лт}}$. Структурная схема приемника определяется видом полезного сигнала.

Так, при использовании в качестве зондирующих сигналов некогерентных радиоимпульсов отраженные от цели сигналы имеют случайные значения начальной фазы и амплитуды. Теория оптимального обнаружения таких сигналов показывает, что составными элементами оптимального приемника являются: линейный фильтр (согласованный с каждым отдельным импульсом и обеспечивающий максимальное отношение пикового значения огибающей к среднеквадратичному значению шума), амплитудный детектор (выделяющий огибающую сигнала и шума) и накопитель

(осуществляющий накопление энергии пачки импульсов), на выходе которого включается пороговое устройство. Накопитель и пороговое устройство могут устанавливаться в индикаторе РЛС.

Передаточная характеристика линейного фильтра должна быть комплексно-сопряженной со спектром радиоимпульсов. Однако технически реализовать такой фильтр сложно. Поэтому применяют фильтр с колокольной амплитудно-частотной характеристикой, у которого полоса пропускания равна ширине спектра сигнала. Такой фильтр называется квазиоптимальным. Он может быть выполнен на частоте принимаемого сигнала f_0 . Однако практически удобнее основное усиление и фильтрацию осуществлять с помощью УПЧ на промежуточной частоте $f_{\text{пр}}$.

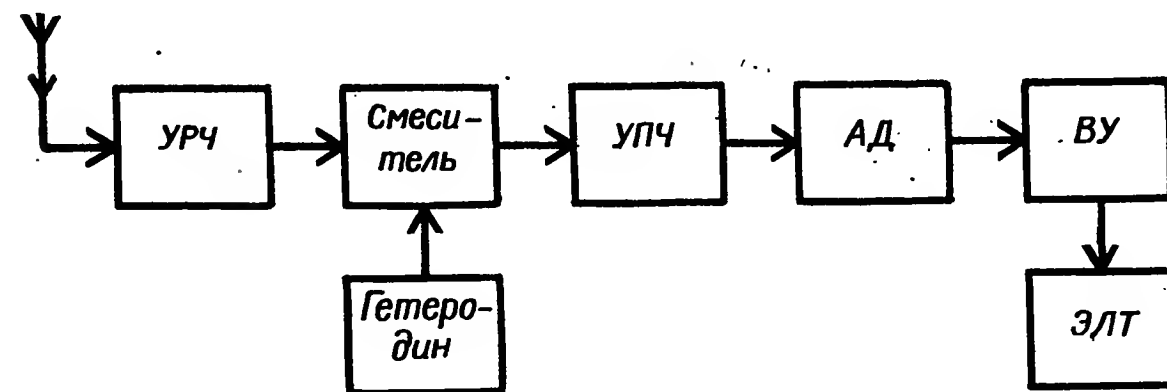


Рис. 6.13. Структурная схема приемно-индикаторного тракта некогерентной импульсной РЛС

Квазиоптимальная структурная схема приемно-индикаторного тракта некогерентной импульсной РЛС изображена на рис. 6.13.

Сигналы, принятые антенной, после усиления по радиочастоте преобразуются на частоту $f_{\text{пр}}$ и подводятся к УПЧ. После УПЧ включен амплитудный детектор. Видеосуилитель (ВУ) играет вспомогательную роль, усиливая видеосигнал по напряжению или мощности. Включенная на выходе ВУ электронно-лучевая трубка (ЭЛТ) выполняет функции накопителя импульсных сигналов, порогового и индикаторного устройств.

Если в качестве зондирующих радиоимпульсов используются когерентные импульсы, то структурная схема обработки отраженных сигналов может быть и когерентной. Принципиально необходимыми элементами обработки таких сигналов являются: линейный фильтр, согласованный с отдельным импульсом, и фазовый детектор (ФД). К последнему с выхода фильтра подводятся отраженные сигналы и опорное напряжение от специального когерентного гетеродина. Кроме того, в состав схемы обработки входят накопительное и пороговое устройства, роль которых может выполнять ЭЛТ. Упрощенная структурная схема приемно-индикаторного тракта когерентной импульсной РЛС представлена на рис. 6.14. При радиальном перемещении цели относительно РЛС на выходе ФД образуются видеоимпульсы, огибающая которых при определенных условиях изменяется с частотой Доплера. Это по-

звояет осуществить селекцию подвижных целей от неподвижных и определить радиальную скорость перемещения цели относительно РЛС (амплитуда сигналов, отраженных от неподвижных относительно РЛС целей, практически постоянна во времени).

При использовании в качестве зондирующих сигналов ЧМ- или ФМ-радиоимпульсов при обработке в приемнике РЛС отражен-

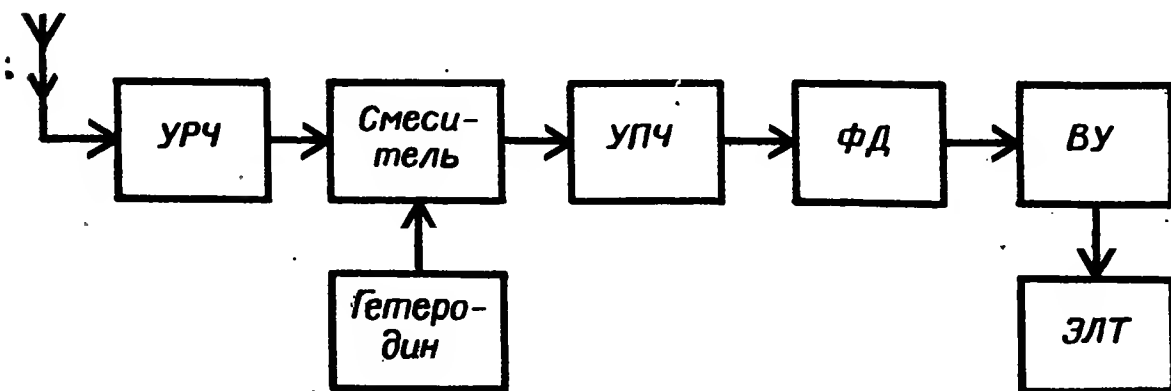


Рис. 6.14. Структурная схема приемно-индикаторного тракта когерентной импульсной РЛС

ных сигналов необходимо применять оптимальные фильтры, осуществляющие сжатие сигналов во времени (по длительности импульса).

6.8. Принцип функционирования импульсной некогерентной РЛС обнаружения

Как следует из названия, данные РЛС служат для обнаружения объектов — воздушных или наземных. С их помощью определяют координаты объектов: дальность — азимут (двухкоординатные РЛС) или дальность — азимут — высоту (трехкоординатные РЛС).

Обнаружение осуществляется путем обзора (просмотра) воздушного пространства (земной поверхности). Для обзора применяются антенны с определенной формой диаграммы направленности. Так, в двухкоординатных РЛС используются антенны, имеющие узкие (шириной в несколько градусов или долей градуса) диаграммы направленности в горизонтальной (азимутальной) плоскости и достаточно широкие (десятки градусов) в вертикальной плоскости (рис. 6.15). При вращении такой антенны обеспечивается не только требуемый обзор пространства в вертикальной и горизонтальной плоскостях, но и определение (по методу максимума) азимута лоцируемых объектов относительно некоторого выбранного направления, например направления на север. Использование импульсного режима излучения дает возможность определять дальности до целей (импульсным методом).

Обзор пространства позволяет получать информацию обо всех целях, находящихся в зоне обзора. Данные о каждой из целей поступают дискретно через интервал времени, равный периоду обзора $T_{обз}$. Для РЛС, работающей в режиме кругового обзора,

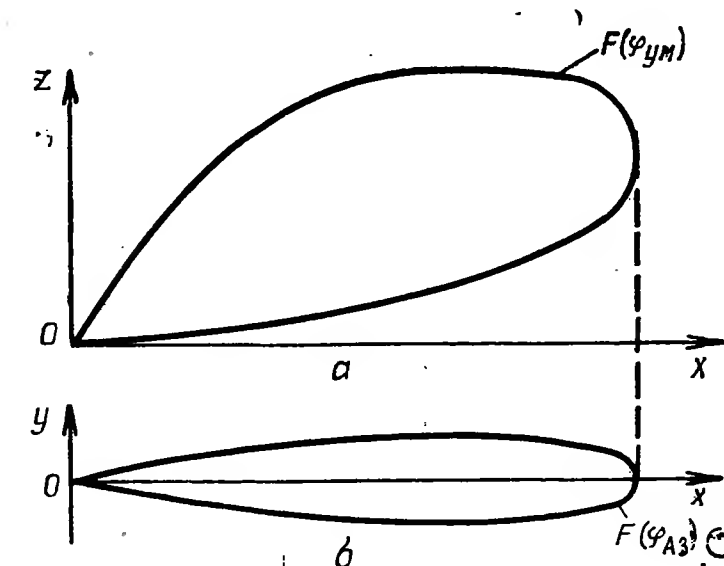


Рис. 6.15. Диаграмма направленности антенны РЛС обнаружения целей в вертикальной (а) и горизонтальной (б) плоскостях

$T_{обз}$ равно времени одного полного оборота антенны (периоду вращения). Время обзора (в секундах)

$$T_{обз} = \frac{60}{n_a}, \quad (6.32)$$

где n_a — скорость вращения антенны (об/мин).

При постоянной скорости вращения за каждый период обзора i -я цель облучается в течение времени

$$T_{обл} = \frac{T_{обз} \varphi_{0,5}}{360}, \quad (6.33)$$

где $\varphi_{0,5}$ — ширина диаграммы направленности антенны РЛС в горизонтальной плоскости по уровню половинной мощности.

За время облучения на вход приемника РЛС от цели поступает несколько отраженных импульсов (пачка импульсов):

$$N_{п} = \frac{T_{обл}}{T_{п}} = \frac{\varphi_{0,5} T_{обз}}{360 T_{п}}. \quad (6.34)$$

При приеме и обработке пачки отраженных импульсов повышается качество обнаружения, так как при этом увеличивается отношение энергии сигнала к спектральной плотности шума.

Структурная схема РЛС, поясняющая принцип ее функционирования, изображена на рис. 6.16.

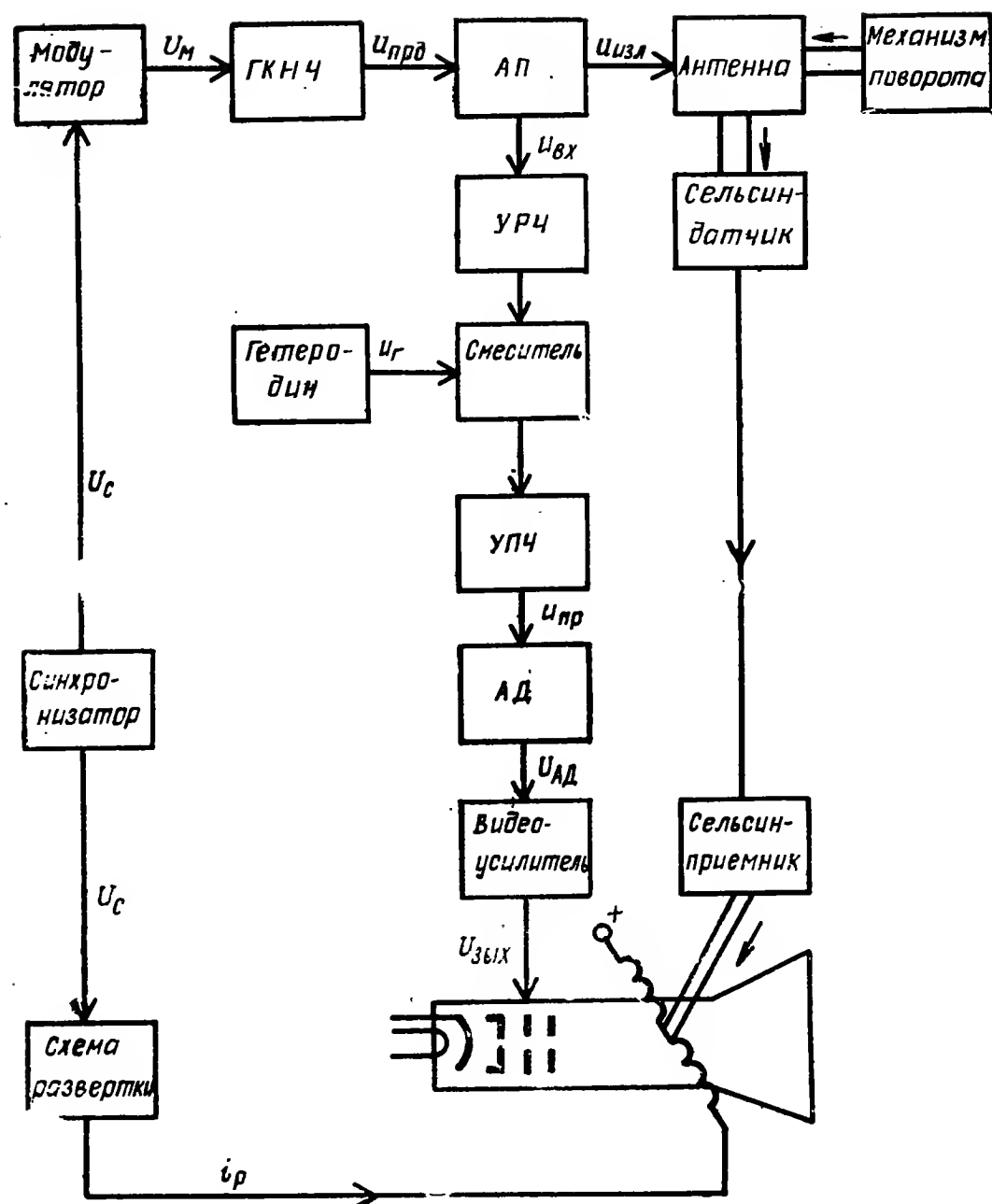


Рис. 6.16. Структурная схема импульсной некогерентной РЛС обнаружения целей

Основными устройствами станции являются антенна, передатчик и приемник. В РЛС применяется одна антенна для излучения зондирующих сигналов и приема сигналов, отраженных от лоцируемых объектов. Принцип действия РЛС поясняется графиками, изображенными на рис. 6.17.

Важным составным элементом импульсных РЛС является генератор синхронизирующих импульсов (синхронизатор). Он генерирует периодическую последовательность импульсов с периодом T_n , необходимых для взаимно связанной работы во времени (синхронизации) передатчика, приемника и индикаторного устройства (рис. 6.17, а). Синхронизирующие импульсы используют

ся для запуска импульсного модулятора передатчика, схемы АРУ приемника и генератора развертки дальности.

Передатчик состоит из модулятора и генератора колебаний несущей частоты (ГКНЧ). Модулятор вырабатывает модулирующие видеоимпульсы длительностью τ_n с периодом T_n (рис. 6.17, б), воздействующие на ГКНЧ. Последний генерирует радиоимпульсы, параметры которых (длительность, период следования, форма огибающей) близки к параметрам импульсов модулятора. Радиоимпульсы передатчика (рис. 6.17, в) через ан-

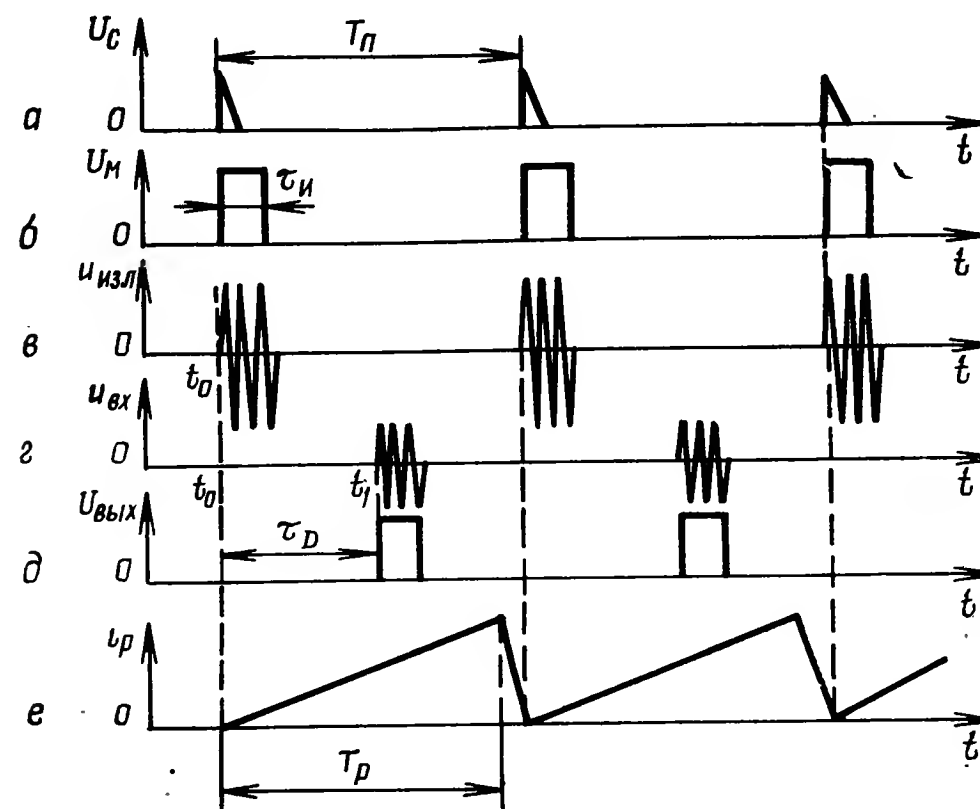


Рис. 6.17. Графики (а—е), поясняющие принцип действия импульсной некогерентной РЛС обнаружения целей

тенный переключатель (переключатель ПРИЕМ — ПЕРЕДАЧА) поступают в антенну и излучаются ею в окружающее пространство в виде зондирующих сигналов. На время излучения, равное примерно τ_n , приемник отключается от антенны. Таким образом, прием отраженных сигналов возможен только в паузах между зондирующими сигналами.

Сигналы, отраженные от объектов, улавливаются антенной РЛС и через тот же антенный переключатель поступают на вход приемника (рис. 6.17, з). При круговом обзоре по мере вращения антенны РЛС огибающая (амплитуда) зондирующих импульсов, облучающих объект, изменяется в соответствии с формой диаграммы направленности антенны. Аналогично изменяется и амплитуда отраженных сигналов (рис. 6.17, д).

В РЛС, как правило, используется супергетеродинный приемник, состоящий из УРЧ, преобразователя частоты, УПЧ, амплитудного детектора (АД) и видеоусилителя. Принципиально необходимыми элементами приемника некогерентной обработки являются УПЧ и АД. После усиления по высокой частоте сигналы преобразуются на промежуточную частоту $f_{\text{пр}}$ и поступают в УПЧ, который обеспечивает основное усиление и фильтрацию сигналов из шума. Полоса пропускания УПЧ согласуется с длительностью импульса с учетом нестабильности частот передатчика и гетеродина приемника. Ее величина выбирается в пределах $\Delta f_{\text{пр}} = \Delta f_{\text{прм}} = (1-3)/\tau_{\text{и}}$. На выходе УПЧ включен АД, который выделяет огибающую каждого радиоимпульса. После усиления в видеоусилителе сигналы поступают на индикатор. Каждый отраженный импульс пачки задержан относительно момента излу-

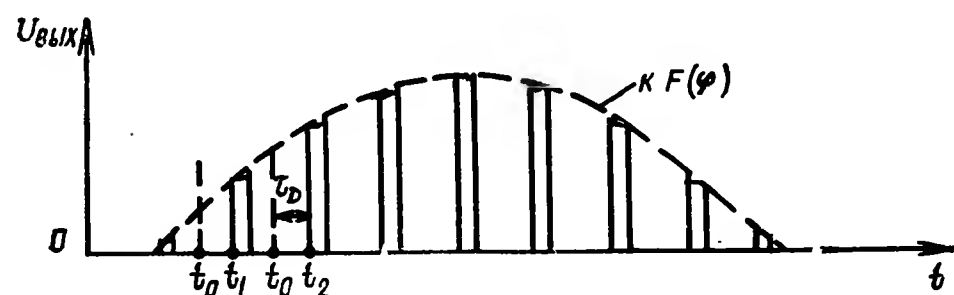


Рис. 6.18. Зависимость амплитуды импульсов на выходе приемника РЛС от времени при однократном обзоре

ния соответствующего зондирующего импульса на время τ_D распространения ЭМВ до цели и обратно. Огибающая амплитуд импульсов $U_{\text{вых}}$ (рис. 6.18) повторяет форму диаграммы направленности антенны РЛС, поэтому сигналы на выходе приемника содержат информацию о дальности цели и ее угловом положении в пространстве. Отсчет угловой координаты цели можно произвести по положению антенны в момент времени, когда огибающая $U_{\text{вых}}$ импульсов максимальна.

Для индикации целей обычно используются двумерные электронно-лучевые индикаторы кругового обзора (ИКО) и «дальность — азимут» (ДАЗ) с яркостной отметкой цели. Яркостная отметка позволяет получить панорамное изображение воздушной или наземной обстановки. При этом на плоском экране можно получить отметку цели как в полярной, так и в прямоугольной системе координат. Полярная система координат применяется в ИКО, указывающем дальность и азимут. Прямоугольная система координат реализуется в индикаторе ДАЗ. Развертка по дальности в ИКО осуществляется с помощью отклоняющей катушки, создающей магнитное поле, которое равномерно перемещает электронный луч от центра экрана ЭЛТ к его краю. Отклоняю-

щая катушка питается пилообразно изменяющимся током i_p (рис. 6.17, е), вырабатываемым схемой развертки.

Азимутальная развертка получается путем механического вращения отклоняющей катушки на горловине трубки синхронно с вращением антенны. При вращении антенны светящийся радиус на экране будет вращаться синхронно с антенной. При согласованном вращении антенны и развертки по направлению светящегося радиуса (положению максимума ДНА) можно определить положение антенны в любой момент времени.

Зондирующий импульс, соответствующий по времени началу развертки, создает точку в центре экрана. Отраженный от цели сигнал приходит в момент времени $t_i = \tau_D i$ и создает отметку на удалении от центра, пропорциональном дальности до цели, и на том радиусе, который соответствует положению антенны при об-

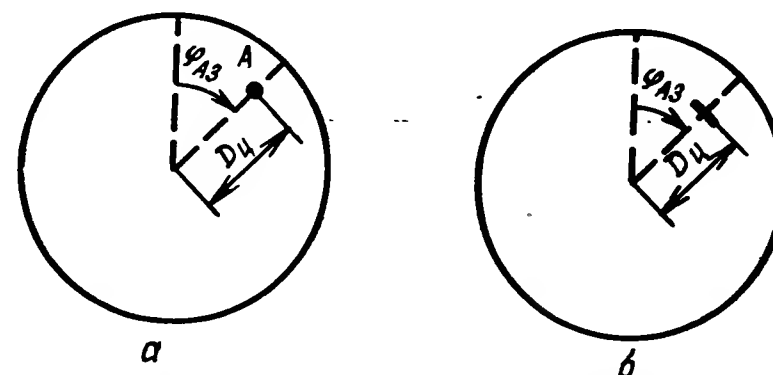


Рис. 6.19. Отметка целей на экране ИКО РЛС при неподвижной (а) и вращающейся антенне (б)

лучении ею данной цели. Таким образом, отметка цели, имеющей координаты $D_{\text{ц}}$ и $\varphi_{\text{аз}}$, при неподвижной антенне, направленной на цель, занимает на экране положение, характеризующееся точкой А (рис. 6.19, а). Можно считать, что за время облучения цели отраженные сигналы характеризуются одним и тем же запаздыванием. Эти сигналы попадают в одну и ту же точку экрана, где осуществляется их накопление. При воздействии $N_{\text{п}}$ импульсов (рис. 6.20, а) яркость пятна увеличивается в $N_{\text{п}}$ раз (рис. 6.20, б). Накопленная мощность сигналов пачки $P_{\text{с}} = N_{\text{п}}^2 P_{\text{с1}}$, где $P_{\text{с1}}$ — мощность одного импульса.

Закон накопления шума является иным. Амплитуда шумового импульса в момент прихода сигнала является случайной величиной. Если учесть, что выбросы шумовых импульсов являются независимыми величинами, то мощность шумовых импульсов $P_{\text{шз}} = N_{\text{п}} P_{\text{ш}}$. При этом яркость пятна за счет воздействия $N_{\text{п}}$ шумовых выбросов увеличится лишь в $\sqrt{N_{\text{п}}}$ раз. За счет накопления импульсов пачки отношение сигнал/шум по напряжению увеличивается в $\sqrt{N_{\text{п}}}$ раз, а по мощности в $N_{\text{п}}$ раз. Этот выигрыш объясняется разными законами накопления сигнала и шума на экране ЭЛТ с яркостной отметкой цели. ЭЛТ позволяет реа-

лизовать функцию сравнения накопленного сигнала с порогом. Фиксация отметки будет осуществляться в момент, когда яркость отметки превысит некоторый минимальный уровень.

Следует отметить, что при вращающейся антенне с узкой диаграммой направленности в азимутальной плоскости на экране ИКО формируется отметка цели в виде «дужки» (рис. 6.19, б). Длина «дужки» пропорциональна ширине ДНА, а ее толщина зависит от длительности импульса и диаметра электронного пятна. Наибольшая яркость свечения отметки цели наблюдается в центре «дужки». В этот момент времени максимум ДНА направлен на цель. Отсчет угловой координаты производится путем измерения угла, образованного лучом, проходящим через центр «дужки», и вертикальной линией, совпадающей с направлением на север.

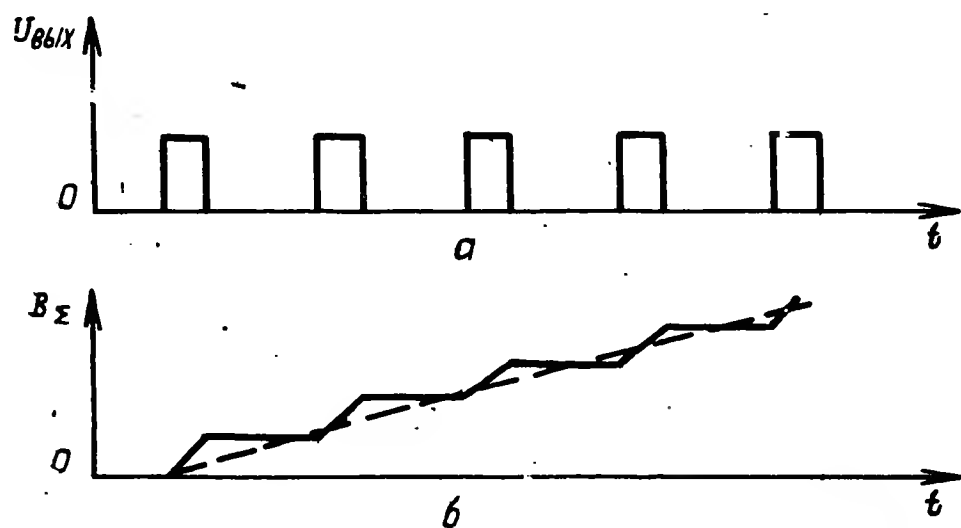


Рис. 6.20. К пояснению принципа накопления пачки импульсов (а, б)

В ИКО применяются трубки с длительным послесвечением, поэтому изображение отметки цели не исчезает полностью до следующего облучения цели. Это дает возможность оператору считывать последовательно координаты нескольких целей.

6.9. Принцип функционирования импульсной когерентной РЛС обнаружения

Отличительной особенностью когерентных импульсных РЛС по сравнению с некогерентными является то, что в них осуществляется когерентная обработка отраженных сигналов. В идеальных условиях, когда известна начальная фаза принимаемого сигнала, такая РЛС позволяет осуществить когерентный прием сигналов. При этом реализуются наилучшие показатели по обнаружению сигналов, разрешению и точности измерений координат и их производных.

В реальных условиях фаза отраженного сигнала является неизвестной. При отражении от неподвижных целей разность фаз принимаемого и излучаемого сигналов остается постоянной во времени. При отражении же от движущихся целей она изменяется от импульса к импульсу по определенному закону.

Различия в структуре отраженных сигналов от подвижных и неподвижных целей позволяют осуществить их разделение. Такое разделение называется селекцией движущейся цели.

Когерентная обработка принимаемых сигналов осуществляется путем их сравнения по фазе с опорным напряжением, вырабатываемым когерентным гетеродином. Колебания последнего жестко связаны по фазе с излучаемыми сигналами. В качестве сравнивающего устройства применяется фазовый детектор.

Принцип действия импульсной когерентной РЛС в режиме обзора поясняется структурной схемой (рис. 6.21).

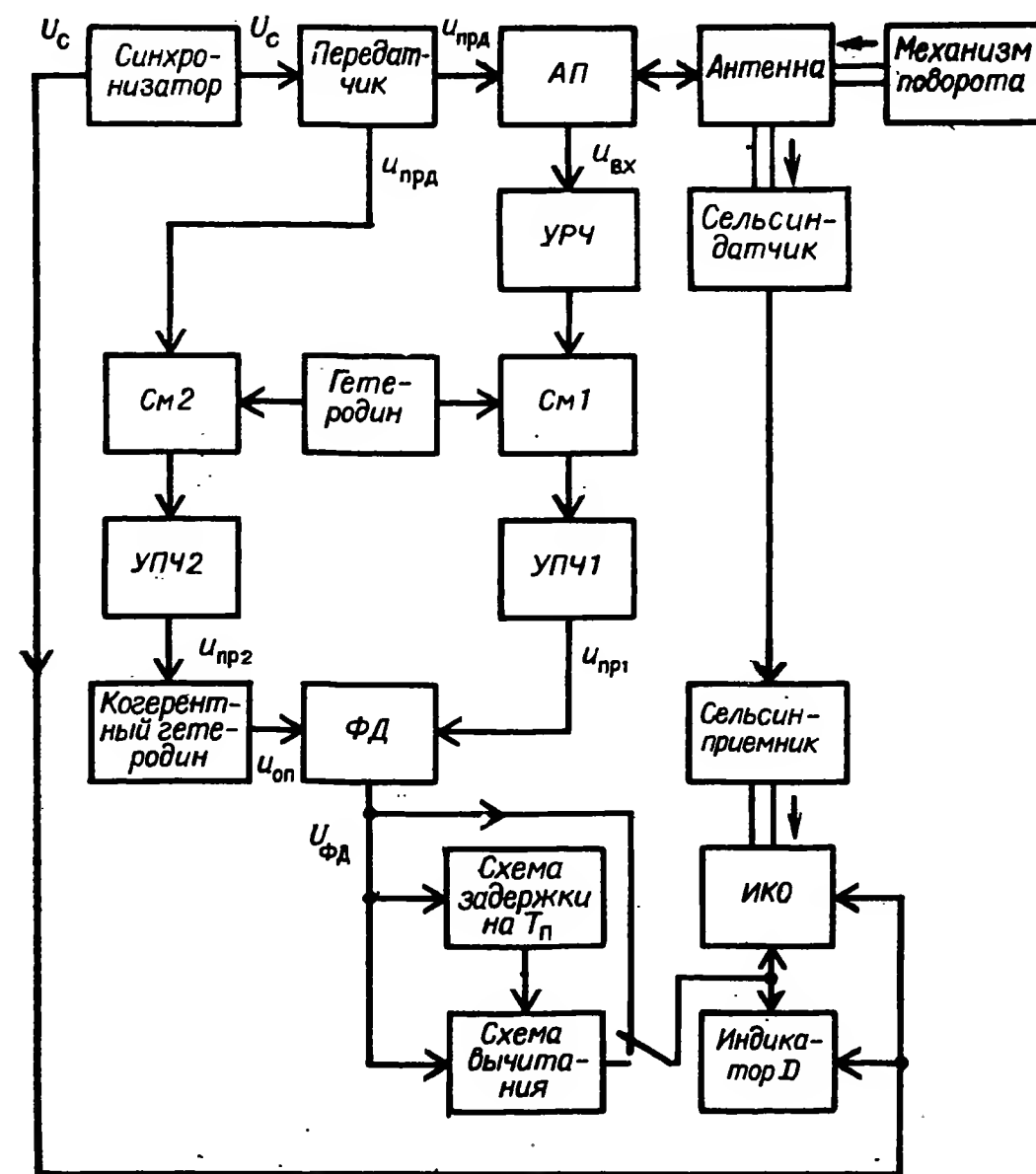


Рис. 6.21. Структурная схема импульсной когерентной РЛС обнаружения целей

Когерентный гетеродин выполняет роль обычного гетеродина приемника. Во время работы РЛС на выходе ГВЧ вырабатывается периодическая последовательность радиоимпульсов, мгновенное значение которых

$$u_{изл}(t) = U_{m0} \cos(\omega_0 t + \varphi_0), \quad nT_n \leq t \leq nT_n + \tau_n, \quad (6.35)$$

где ω_0 — несущая частота; φ_0 — начальная фаза; $n=0, 1, 2, \dots$

Отраженный сигнал на входе приемника будет иметь вид

$$u_{вх}(t) = U_{mвх}(t) \cos[\omega_0(t - \tau_D) + \varphi_0 + \varphi_{отр}], \quad (6.36)$$

где $\varphi_{отр}$ — изменение фазы сигнала при отражении от цели; $U_{mвх}$ — амплитуда входного сигнала.

Временная задержка отраженного сигнала

$$\tau_D = \frac{2D(t)}{c} = \frac{2\left(D_0 - \int_0^t V_p(t) dt\right)}{c},$$

где V_p — радиальная скорость движения цели относительно РЛС.

При постоянной радиальной скорости

$$\tau_D = \frac{2(D_0 \mp V_p t)}{c}, \quad (6.37)$$

где D_0 — начальная дальность до цели, с которой началось ее измерение.

Знак «минус» в выражении (6.37) свидетельствует о приближении цели к РЛС, а знак «плюс» — об ее удалении.

Подставив выражение (6.37) в (6.36), получим

$$u_{вх}(t) = U_{mвх}(t) \cos[(\omega_0 \pm \Omega_d)t + \varphi_0 + \varphi_{отр} + \varphi_{D_0}], \quad (6.38)$$

где $\varphi_{D_0} = 2D_0\omega_0/c$ — начальная фаза, обусловленная начальным запаздыванием ЭМВ; $\Omega_d = 2V_p\omega_0/c = 2V_p/\lambda$ — доплеровское приращение частоты отраженного сигнала.

Принятый сигнал после преобразования и усиления на промежуточной частоте будет представлять собой последовательность радиоимпульсов вида

$$u_{пр1}(t) = k_1 U_{mвх}(t) \cos[(\omega_{пр} \pm \Omega_d)t + \varphi_0 + \varphi_{отр} + \varphi_{D_0}]; \quad (6.39)$$

$$nT_n + \tau_D \leq t \leq nT_n + \tau_n + \tau_D,$$

где k_1 — общий коэффициент усиления линейного тракта приемника до фазового детектора. Это напряжение поступает на один из входов фазового детектора. На другой вход фазового детектора поступает непрерывное опорное колебание когерентного гетеродина

$$u_{оп}(t) = U_{m оп} \cos(\omega_{пр} t + \varphi_0). \quad (6.40)$$

В фазовом детекторе осуществляется операция умножения колебаний (6.38) и (6.40). Результат перемножения усредняется с помощью фильтра нижних частот. В результате получим

$$u_{ФД}(t) = k \overline{u_{оп}(t) u_{пр1}(t)} = k_1 k_2 U_{mвх}(t) \cos(\Omega_d t + \varphi_0'), \quad (6.41)$$

где $k_2 = 1/2kU_{m оп}$ — коэффициент передачи фазового детектора; $\varphi_0' = \varphi_{отр} + \varphi_{D_0}$.

Если цель неподвижна ($F_d = 0$), то напряжение на выходе ФД представляет собой видеоимпульсы постоянной амплитуды (рис. 6.22, а). Величина и знак этих импульсов зависят от φ_0' .

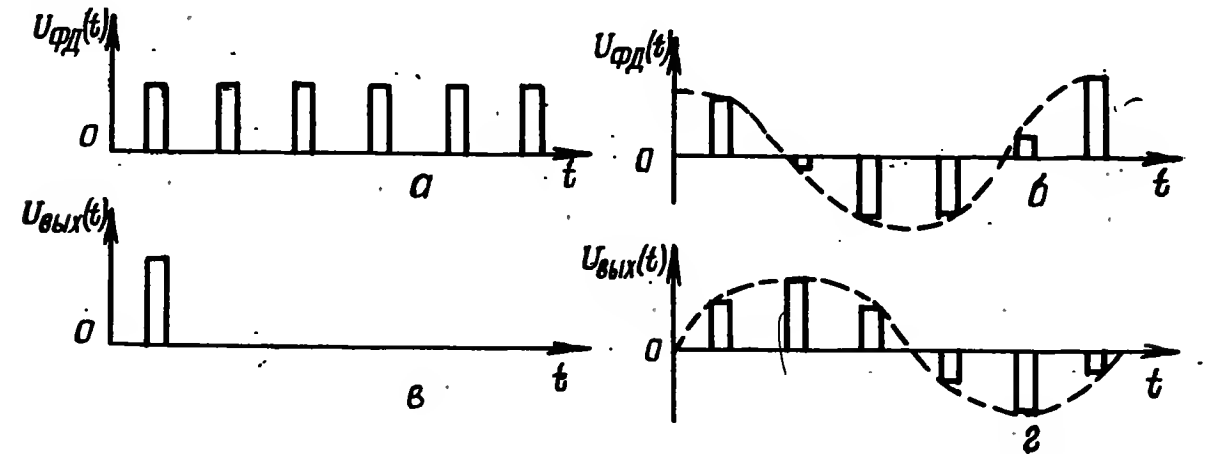


Рис. 6.22. К пояснению принципа действия схемы череспериодной компенсации

Если цель подвижна ($F_d \neq 0$), то видеоимпульсы будут промодулированы по амплитуде частотой Доплера (рис. 6.22, б). Сказанное справедливо для импульсного излучения при условии, что $F_d \leq F_n/2$. Зависимость частоты модуляции F_m от соотношения $F_d T_n$ показана на рис. 6.23. При $F_d T_n = 1, 2 \dots$ частота модуляции

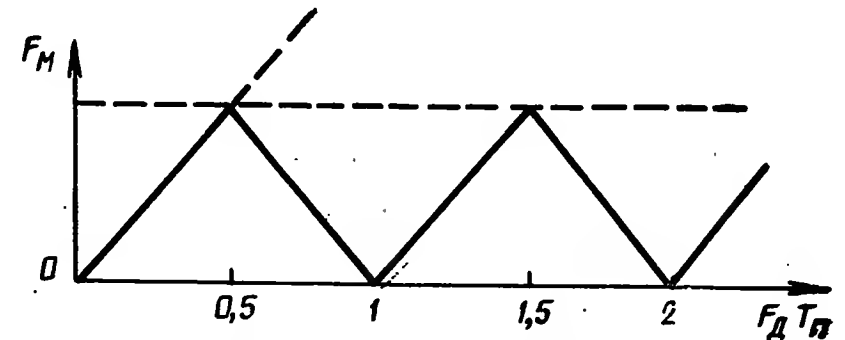


Рис. 6.23. График зависимости частоты модуляции импульсов от соотношения $F_d T_n$

выходных импульсов равна нулю. Эти точки соответствуют так называемым «слепым» скоростям. Цели, летящие с радиальными скоростями:

$$V_{р.сл} = \frac{\lambda}{2} F_n n, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

не могут быть обнаружены, так как модуляция при этих значениях скорости отсутствует.

В качестве выходного устройства в когерентных импульсных РЛС можно применять ЭЛТ с амплитудной или яркостной отметкой.

При использовании в качестве индикатора ЭЛТ с амплитудной отметкой (рис. 6.24, а) отметки от неподвижных целей на эк-

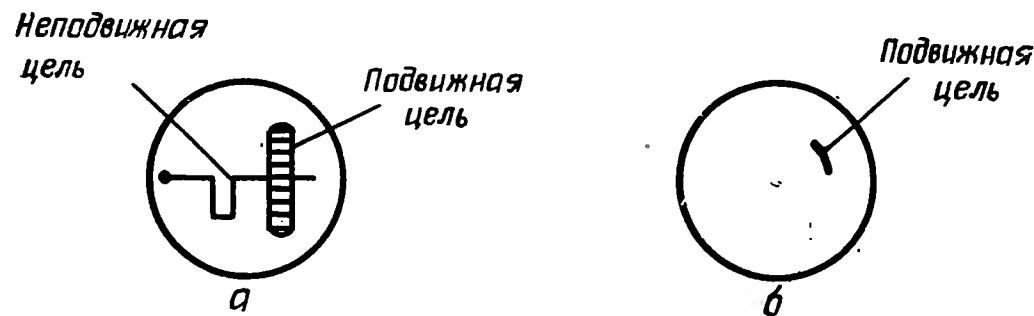


Рис. 6.24. Отметки целей на экране ЭЛТ с амплитудной (а) и яркостной (б) отметками

ране видны в виде импульсов постоянной амплитуды положительной или отрицательной полярности, а отметки от движущихся целей — в виде двустороннего пульсирующего импульса. Эта пульсация возникает из-за изменения от периода к периоду амплитуды и полярности импульсов вследствие движения цели.

При использовании в качестве индикатора ЭЛТ с яркостной отметкой применяют схему череспериодной компенсации (СЧК), состоящую из линии задержки ($\tau_z = T_n$) и схемы вычитания. На выходе СЧК формируется напряжение, пропорциональное разности амплитуд импульсов через период повторения (рис. 6.22, в, г). Эта схема используется для селекции подвижных целей на ИКО и ДАЗ. Отметка от неподвижных целей не будет наблюдаться на этих индикаторах (рис. 6.24, б).

Сигнал с выхода схемы череспериодной компенсации представляет собой последовательность видеоимпульсов, амплитуда которых промодулирована доплеровской частотой по закону синуса. Максимальная амплитуда импульсов

$$U_{m \text{ вых}} = 2k_1 k_2 U_{m \text{ вх}} \left| \sin \frac{\Omega_d T_n}{2} \right|. \quad (6.42)$$

Когерентная импульсная РЛС по сравнению с некогерентной позволяет разделить цели на подвижные и неподвижные, измерить радиальную скорость движущихся целей, улучшить характеристики обнаружения при действии пассивных помех.

В. АВТОМАТИЧЕСКОЕ СОПРОВОЖДЕНИЕ ЛОЦИРУЕМЫХ ОБЪЕКТОВ

6.10. Автоматическое сопровождение целей по дальности

В импульсных РЛС определение дальности осуществляется путем измерения запаздывания отраженного сигнала τ_D по отношению к моменту излучения зондирующего сигнала.

В системах автоматического сопровождения цели по дальности (АСД) определение τ_D сводится к измерению срединного запаздывания τ_c двух следящих импульсов (полустробов) в момент совпадения с центром отраженного сигнала (рис. 6.25).

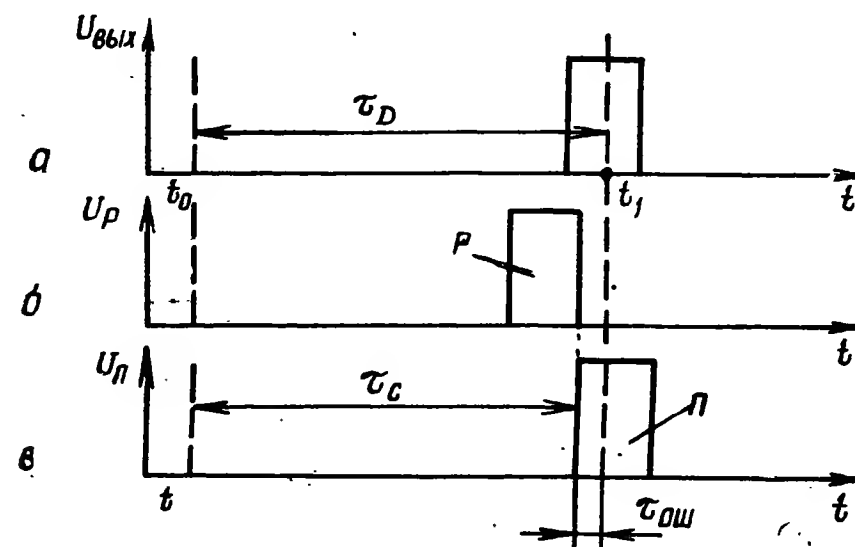


Рис. 6.25. К пояснению принципа автоматического сопровождения цели по дальности:
а — отраженный сигнал; б — ранний полустроб; в — поздний полустроб

Один из полустробов называется ранним Р, а другой — поздним П. Положение следящих импульсов непрерывно сравнивается с положением отраженного сигнала. Возникшее рассогласование сводится с помощью следящей системы к нулю. При этом в режиме точного слежения $\tau_c = \tau_D$.

В режиме АСЦ представляется возможность селекции сигнала выбранной цели по дальности. Указанная возможность реализуется путем отпираания приемника на короткий интервал во время прихода сигналов, отраженных от этой цели. Следовательно, система АСД должна решать следующие задачи:

- поиск и селекцию цели по дальности;
- захват и автосопровождение цели по дальности;
- непрерывное измерение дальности и радиальной скорости сопровождаемой цели.

Структурная схема системы АСД изображена на рис. 6.26. Система АСД работает в режимах поиска и слежения.

В режиме поиска сигнала, отраженного от цели, стробирующий импульс, образованный суммированием двух следящих полустробов, перемещается по шкале времени (дальности) от мини-

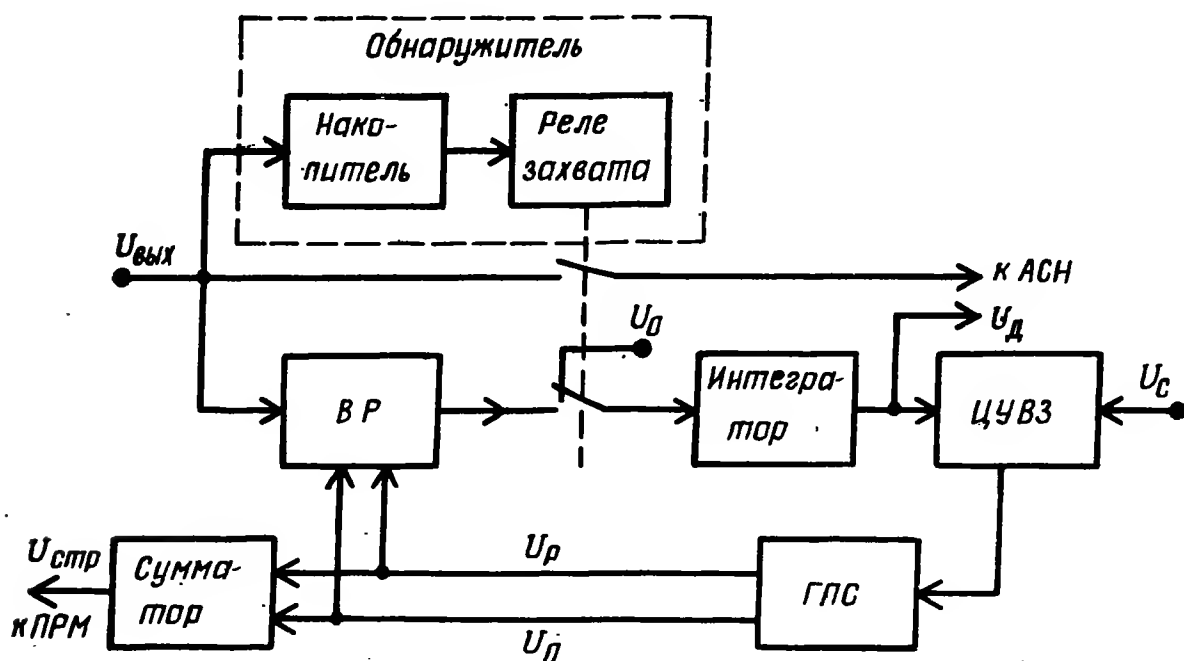


Рис. 6.26. Структурная схема системы АСД

мальных значений задержек $\tau_{D \min}$ ($D_{ц \min}$) до максимальных значений $\tau_{D \max}$ ($D_{ц \max}$). Для этого на интегратор подается постоянное напряжение U_0 . Под действием этого напряжения на выходе интегратора образуется возрастающее по линейному закону управляющее напряжение U_D , которое воздействует на цепь управляемой временной задержки (ЦУВЗ). В результате на ее выходе изменяется задержка τ_z синхрои́мпульсов и положение следящих импульсов на временной оси, вырабатываемых генератором полустробов (ГПС). Характеристика ЦУВЗ показана на рис. 6.27.

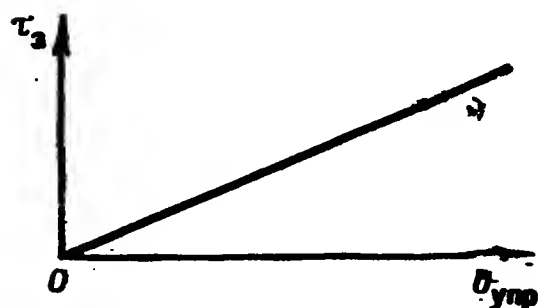


Рис. 6.27. Регулировочная характеристика цепи управляемой временной задержки

В момент совпадения сигнала, отраженного от цели, со стробирующим импульсом $U_{стр}$ (рис. 6.26) на выходе приемника появляются видеоимпульсы $U_{вых}$. В схеме поиска и захвата имеется накопитель, в котором происходит амплитудное суммирование

импульсов, подаваемых с выхода приемника. Суммарное напряжение на выходе накопителя U_{Σ} сравнивается с пороговым $U_{пор}$. Если U_{Σ} превышает $U_{пор}$, то срабатывает реле захвата. Реле отключает источник U_0 и подключает интегратор к выходу временного различителя (дискриминатора), а выход приемника — к элементам системы автоматического сопровождения цели по направлению (АСН). Система АСД вместе с системой АСН переходит в режим автосопровождения цели.

Захват цели на автосопровождение осуществляется не по одному импульсу, а по пачке импульсов. Это приводит к повышению вероятности захвата.

В режиме слежения на временной различитель (ВР) поступают импульсы с выхода приемника $U_{вых}$ и два следящих полустроба (ранний U_p и поздний U_n). Их относительное положение показано на рис. 6.25, б, в. ВР преобразует рассогласование $\tau_{ош}$ в напряжение $U_{вр}$, величина и полярность которого однозначно определяются рассогласованием. ВР (рис. 6.28) состоит из двух схем

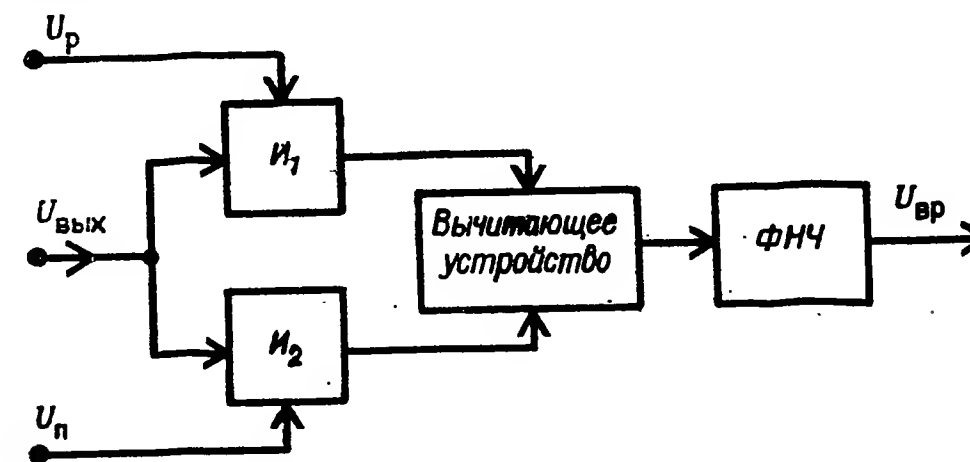


Рис. 6.28. Структурная схема временного различителя

И, вычитающего устройства и фильтра низших частот (ФНЧ). Схемы И, выполняя операцию умножения, образуют временной селектор. При этом на одну из схем И подается ранний строб U_p , а на другую — поздний U_n . Импульсы, модулированные по длительности, с выхода схем И после взаимного вычитания усредняются ФНЧ.

Дискриминационная характеристика ВР $U_{вр}(z)$ приведена на рис. 6.29. Рабочий участок характеристики является линейной нечетной функцией, проходящей через нуль.

Напряжение $U_{вр}$, воздействуя на интегратор, приводит к увеличению или уменьшению управляющего напряжения, пропорционального дальности до цели. Это напряжение в свою очередь воздействует на ЦУВЗ и изменяет задержку τ_z синхронизирующих импульсов, запускающих генератор полустробов ГПС. В результате изменяется временное положение следящих полустробов и самого строба, образуемого их суммированием. В режиме АСД система АСД обеспечивает непрерывное совмещение оси симмет-

рии следящих полустроби с центром импульса, отраженного от цели. В этом случае напряжение U_D на выходе интегратора будет пропорциональным D_{Σ} .

Система АСД с одним интегратором представляет собой аstaticкую систему первого порядка. Она обладает двумя недостатками:

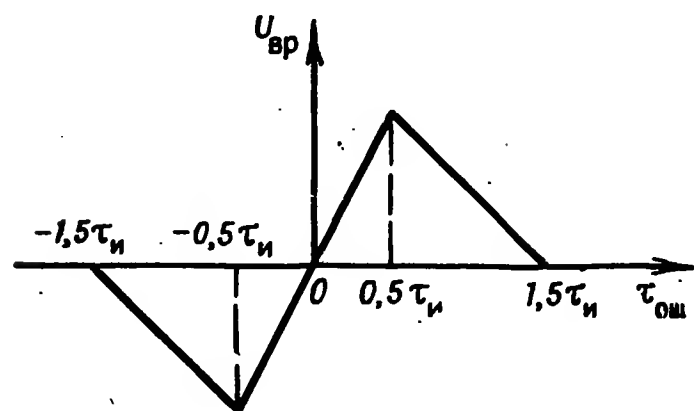


Рис. 6.29. Дискриминационная характеристика временного различителя

— в установившемся режиме существует динамическая (скоростная) ошибка в измерении дальности за счет движения цели;

— при случайном кратковременном пропадании импульсов, отраженных от цели, следящие импульсы остаются неподвижными на временной оси (схема обладает временем памяти по дальности). При больших скоростях движения цели это может привести к срыву автосопровождения, так как импульс цели после нового появления не будет совпадать со следящими полустроби.

Для устранения этого недостатка применяется схема АСД с двумя интеграторами, которая обладает памятью по скорости. При пропадании сигналов $U_{\text{вых}}$ напряжение на выходе первого интегратора сохраняется некоторое время неизменным, а на выходе второго интегратора будет линейно возрастать или уменьшаться, обеспечивая перемещение следящих импульсов с прежней скоростью.

В результате после повторного появления импульсов, отраженных от цели, будет обеспечено (при неизменной скорости цели) их совпадение со следящими стробами.

Скоростная ошибка измерения дальности в такой системе равна нулю. Кроме того, наличие на входе второго интегратора напряжения, пропорционального скорости сближения $V_{\text{сбл}}$, позволяет осуществить ее измерение. Измеряя напряжение на выходе второго интегратора, можно определить и дальность до цели.

6.11. Автоматическое сопровождение целей по направлению

Системы автоматического сопровождения по направлению (АСН) являются составной частью РЛС АСЦ. Они позволяют непрерывно измерять угловые координаты цели и их производ-

ные. Точность определения угловых координат, как правило, выше, чем в РЛС обнаружения.

Как отмечалось в п. 6.3.2, система АСН состоит из пеленгационного и исполнительного устройств. При слежении за одной целью в системах АСН используется равносигнальный метод пеленгации, при котором с помощью антенны создается равносигнальное направление (РСН), определяемое углом φ_A (рис. 6.8, 6.9). Это положение сравнивается с положением цели φ_{Σ} . Система АСН построена так, что при появлении ошибки $\varphi = \varphi_A - \varphi_{\Sigma} \neq 0$ на выходе пеленгационного устройства вырабатывается напряжение $U_{\text{пу}}$, пропорциональное величине ошибки φ . Знак этого напряжения зависит от стороны отклонения цели от РСН. Напряжение $U_{\text{пу}}$ воздействует на исполнительное устройство (привод антенны), которое поворачивает антенну, а вместе с ней и РСН в сторону уменьшения угла φ . Таким образом, осуществляется непрерывное совмещение РСН с направлением на цель.

Различают системы АСН моноимпульсного типа (с одновременным сравнением сигналов) и системы АСН с коническим сканированием (с последовательным сравнением сигналов).

6.11.1. Принцип функционирования моноимпульсной системы АСН с амплитудной суммарно-разностной обработкой принимаемых сигналов

Принцип действия моноимпульсной системы АСН с амплитудной суммарно-разностной обработкой при пеленгации цели в одной плоскости поясняется схемой, изображенной на рис. 6.30.

С помощью зеркальной антенны, имеющей два облучателя, смещенных относительно ее фокуса, создаются две идентичные диаграммы направленности, максимумы которых смещены один

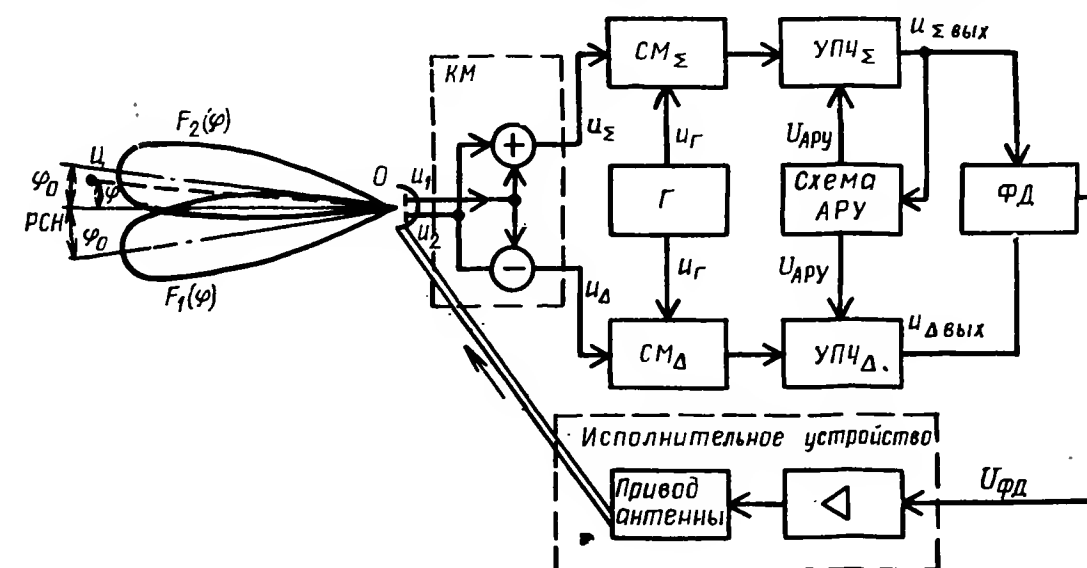


Рис. 6.30. Структурная схема моноимпульсной системы АСН

относительно другого на угол $2\varphi_0 \approx \varphi_{0,5}$. Пересечение диаграмм направленности образует РСН. Если цель находится на РСН, амплитуды принятых сигналов $u_1(t)$ и $u_2(t)$ на выходе облучателей равны.

Предположим, что направление на цель отклонено от РСН на угол φ и создает у антенны РЛС напряженность поля

$$e(t) = E \cos(\omega_0 t + \psi_0). \quad (6.43)$$

Сигналы на выходе облучателей в этом случае будут

$$\left. \begin{aligned} u_1(t) &= U_{mc} F(\varphi_0 - \varphi) \cos(\omega_0 t + \psi_0); \\ u_2(t) &= U_{mc} F(\varphi_0 + \varphi) \cos(\omega_0 t + \psi_0), \end{aligned} \right\} \quad (6.44)$$

где U_{mc} — амплитуда сигнала при нахождении цели в направлении максимума диаграммы направленности антенны. Напряжения $u_1(t)$ и $u_2(t)$ поступают на вход кольцевого моста. Последний осуществляет их суммирование и вычитание. На выходах кольцевого моста получаем

$$\left. \begin{aligned} u_{\Sigma}(t) &= U_{mc} [F(\varphi_0 + \varphi) + F(\varphi_0 - \varphi)] \cos(\omega_0 t + \psi_0); \\ u_{\Delta}(t) &= U_{mc} [F(\varphi_0 - \varphi) - F(\varphi_0 + \varphi)] \cos(\omega_0 t + \psi_0). \end{aligned} \right\} \quad (6.45)$$

Из этих выражений видно, что $u_{\Sigma}(t)$ и $u_{\Delta}(t)$ являются соответственно четной и нечетной функциями угла φ . Амплитуда разностного сигнала несет информацию о величине угла φ , а фаза высокочастотного заполнения определяет сторону отклонения цели от РСН. Следует иметь в виду, что фаза разностного сигнала при переходе цели через РСН изменяется на π .

Далее производится преобразование $u_{\Sigma}(t)$ и $u_{\Delta}(t)$ в смесителях и их усиление на промежуточной частоте $\omega_{пр} = \omega_0 - \omega_r$. Так как в обоих смесителях используется сигнал общего гетеродина, относительный фазовый сдвиг сигналов на выходах УПЧ не изменяется. Мгновенные значения напряжений этих сигналов на выходах УПЧ

$$\left. \begin{aligned} u_{\Sigma \text{ вых}}(t) &= k_{см} k_{УПЧ} U_{mc} [F(\varphi_0 + \varphi) + \\ &+ F(\varphi_0 - \varphi)] \cos(\omega_{пр} t + \psi_0 + \psi_r); \\ u_{\Delta \text{ вых}}(t) &= k_{см} k_{УПЧ} U_{mc} [F(\varphi_0 - \varphi) - \\ &- F(\varphi_0 + \varphi)] \cos(\omega_{пр} t + \psi_0 + \psi_r). \end{aligned} \right\} \quad (6.46)$$

Здесь $k_{см}$ и $k_{УПЧ}$ — коэффициенты передачи смесителя и УПЧ, принимаемые одинаковыми для обоих каналов, ψ_r — постоянная фаза колебаний гетеродина.

В системе АСН используется схема автоматической регулировки усиления (АРУ), которая изменяет усиление в обоих каналах в соответствии с амплитудой суммарного сигнала. Это позволяет исключить зависимость выходных напряжений УПЧ от амплитуды принимаемых сигналов.

Коэффициент усиления УПЧ определяется формулой $k_{УПЧ} = k_0 - \alpha U_{АРУ}$. Здесь $U_{АРУ}$ — напряжение регулировки усиления УПЧ; k_0 — коэффициент усиления УПЧ при $U_{АРУ} = 0$; α — постоянный коэффициент.

Напряжение, вырабатываемое схемой АРУ:

$$U_{АРУ} = k_{АРУ} U_{\Sigma \text{ вых}} = k_{АРУ} k_{см} k_{УПЧ} [F(\varphi_0 - \varphi) + F(\varphi_0 + \varphi)] U_{mc},$$

где $k_{АРУ}$ — коэффициент передачи схемы АРУ. Тогда

$$k_{УПЧ} = \frac{k_0}{1 + \alpha k_{АРУ} k_{см} [F(\varphi_0 - \varphi) + F(\varphi_0 + \varphi)] U_{mc}}.$$

Обычно

$$\alpha k_{АРУ} k_{см} [F(\varphi_0 - \varphi) + F(\varphi_0 + \varphi)] U_{mc} = \mu U_{\Sigma} \gg 1.$$

В этом случае

$$k_{УПЧ} = \frac{k_0}{\mu U_{\Sigma}}; \quad \mu = \alpha k_{АРУ} k_{см}.$$

Зависимость коэффициента $k_{УПЧ}$ от амплитуды входного сигнала изображена на рис. 6.31.

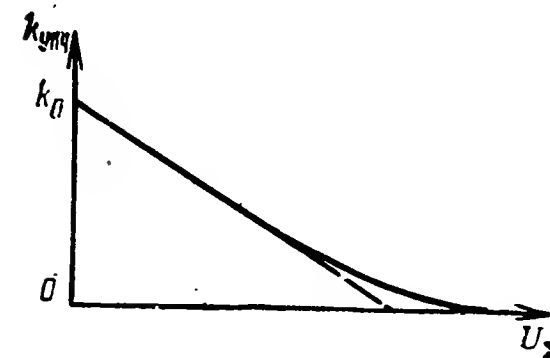


Рис. 6.31. Зависимость коэффициента усиления УПЧ от амплитуды входного сигнала

С учетом действия устройства АРУ сигналы на выходах УПЧ будут

$$\begin{aligned} u_{\Sigma \text{ вых}}(t) &= U_{m0} \cos(\omega_{пр} t + \psi_0 + \psi_r); \\ u_{\Delta \text{ вых}}(t) &= U_{m0} \frac{F(\varphi_0 - \varphi) - F(\varphi_0 + \varphi)}{F(\varphi_0 - \varphi) + F(\varphi_0 + \varphi)} \cos(\omega_{пр} t + \psi_0 + \psi_r), \end{aligned}$$

где $U_{m0} = k_0 / \alpha k_{АРУ}$. Из этих выражений видно, что амплитуды сигналов на выходах УПЧ не зависят от амплитуды принимаемых сигналов.

Напряжение с выходов УПЧ суммарного и разностного каналов подводится к ФД. В последнем осуществляется перемножение и усреднение полученного результата за время $T_{ФД} \gg T_{пр} = 2\pi/\omega_{пр}$.

Выходное напряжение фазового детектора

$$U_{ФД}(\varphi) = k u_{\Sigma \text{ вых}}(t) u_{\Delta \text{ вых}}(t) = k_{ФД} U_{m0} \frac{F(\varphi_0 - \varphi) - F(\varphi_0 + \varphi)}{F(\varphi_0 - \varphi) + F(\varphi_0 + \varphi)}, \quad (6.47)$$

где $k_{\text{ФД}} = \frac{1}{2} k U_{m0}$ — коэффициент передачи фазового детектора, k — постоянный коэффициент.

Характер изменения пеленгационной характеристики с учетом боковых лепестков диаграммы направленности антенны показан на рис. 6.32. Из этого графика видно, что напряжение на выходе фазового детектора равно нулю, если цель находится на РСН ($\varphi = 0$). В интервале углов $-\frac{1}{2}\varphi_{0,5} < \varphi \leq \frac{1}{2}\varphi_{0,5}$ величина и полярность напряжения $U_{\text{ФД}}(\varphi)$ однозначно определяют положение цели относительно РСН. Этот участок пеленгационной характеристики является рабочим. Для малых углов φ можно ограничиться линейным выражением функции степенным рядом в окрестности точки φ_0 , т. е.

$$F(\varphi_0 \mp \varphi) = F(\varphi_0)(1 \pm k_F \varphi). \quad (6.48)$$

Здесь $k_F = \frac{|F'(\varphi_0)|}{F(\varphi_0)}$ — пеленгационный коэффициент передачи антенны по напряжению. Подставив это выражение в равенство (6.47), получим

$$U_{\text{ФД}}(\varphi) = U_{\text{пу}}(\varphi) = k_{\text{пу}} \varphi, \quad (6.49)$$

где $k_{\text{пу}} = k_F k_0 k_{\text{ФД}} / \alpha k_{\text{АРУ}}$ — коэффициент передачи пеленгационного устройства. Выражение (6.49) показывает, что пеленгационное устройство можно рассматривать как усилительное звено с коэффициентом передачи $k_{\text{пу}}$.

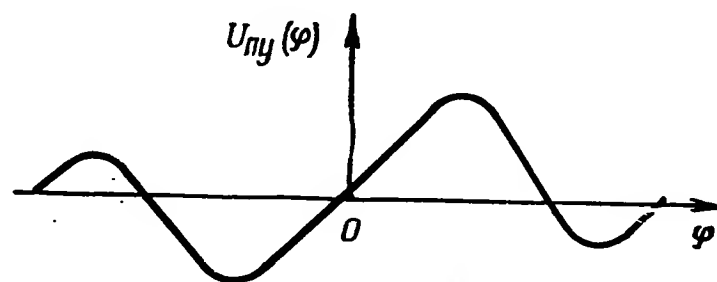


Рис. 6.32. Пеленгационная характеристика системы АСН

В случае активной радиолокации с общей антенной на передачу и прием коэффициент k_F заменяется на пеленгационный коэффициент передачи антенны по мощности

$$k_G = 2k_F.$$

Напряжение с выхода фазового детектора поступает к исполнительному устройству, изменяющему пространственное положение РСН так, что в установившемся положении $\varphi_A = \varphi_D$. В состав исполнительного устройства входят усилители мощности и привод антенны (двигатель).

Рассмотренная система АСН представляет собой систему непрерывного регулирования с астатизмом первого порядка (одним интегратором).

При пространственной пеленгации цели используются два устройства, осуществляющих слежение за целью по азимуту и по углу места.

Существенным достоинством моноимпульсной системы АСН с амплитудной суммарно-разностной обработкой является то, что она не реагирует на случайные изменения амплитуды и фазы входного сигнала. Это означает, что при создании помехи с цели система АСН в принципе способна сопровождать источник помехового сигнала (цель) по направлению даже в том случае, когда подавлены системы АСД и АСС.

6.11.2. Принцип действия системы АСН с коническим сканированием диаграммы направленности антенны

Принцип действия системы АСН с коническим сканированием поясняется схемой, изображенной на рис. 6.33. Как отмечалось, в такой системе используется одна антенна, диаграмма направлен-

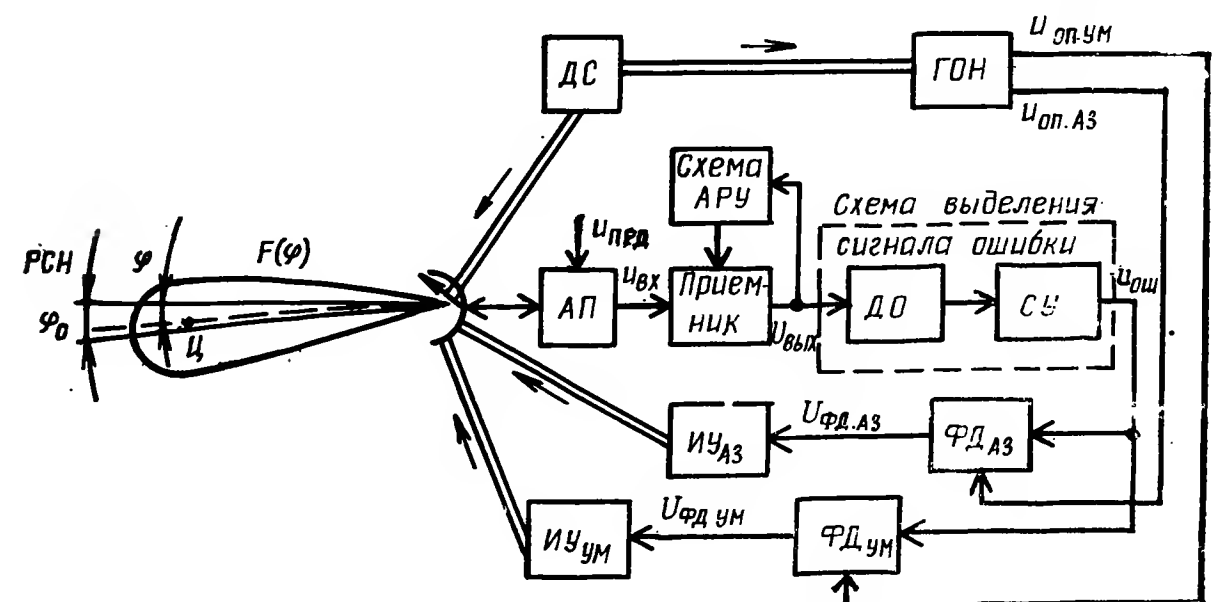


Рис. 6.33. Структурная схема системы АСН с коническим сканированием диаграммы направленности антенны

ности которой $F(\varphi)$ смещена на некоторый угол относительно ее оси и вращается с постоянной скоростью $\Omega_{\text{ск}}$ (рис. 6.9). Направление максимума диаграммы направленности описывает в пространстве при вращении конус.

Угол смещения максимума ДНА относительно РСН составляет обычно $(0,5—0,6)\varphi_{0,5}$. Оценим качественно зависимость амплитуды сигнала на выходе антенны от взаимного пространственно-

го положения цели и ДНА. Предполагаем при этом, что цель является источником импульсного излучения. Рассмотрим зависимость амплитуды входного сигнала приемника от времени при условии, что цель занимает в пространстве соответственно положения $O', A, C, A', B', B, Д$ и $Ц$ (рис. 6.9). За начало отсчета $t=0$ принимаем момент времени, когда диаграмма направленности антенны (ДНА) занимает верхнее положение.

Если цель находится на РСН (в точке O'), то амплитуда сигналов U_c (U_{m0}) на входе приемника не зависит от положения ДНА (рис. 6.34, а). При нахождении цели в точке A в момент времени $t=0$ максимум ДНА будет направлен на цель. В этом случае ам-

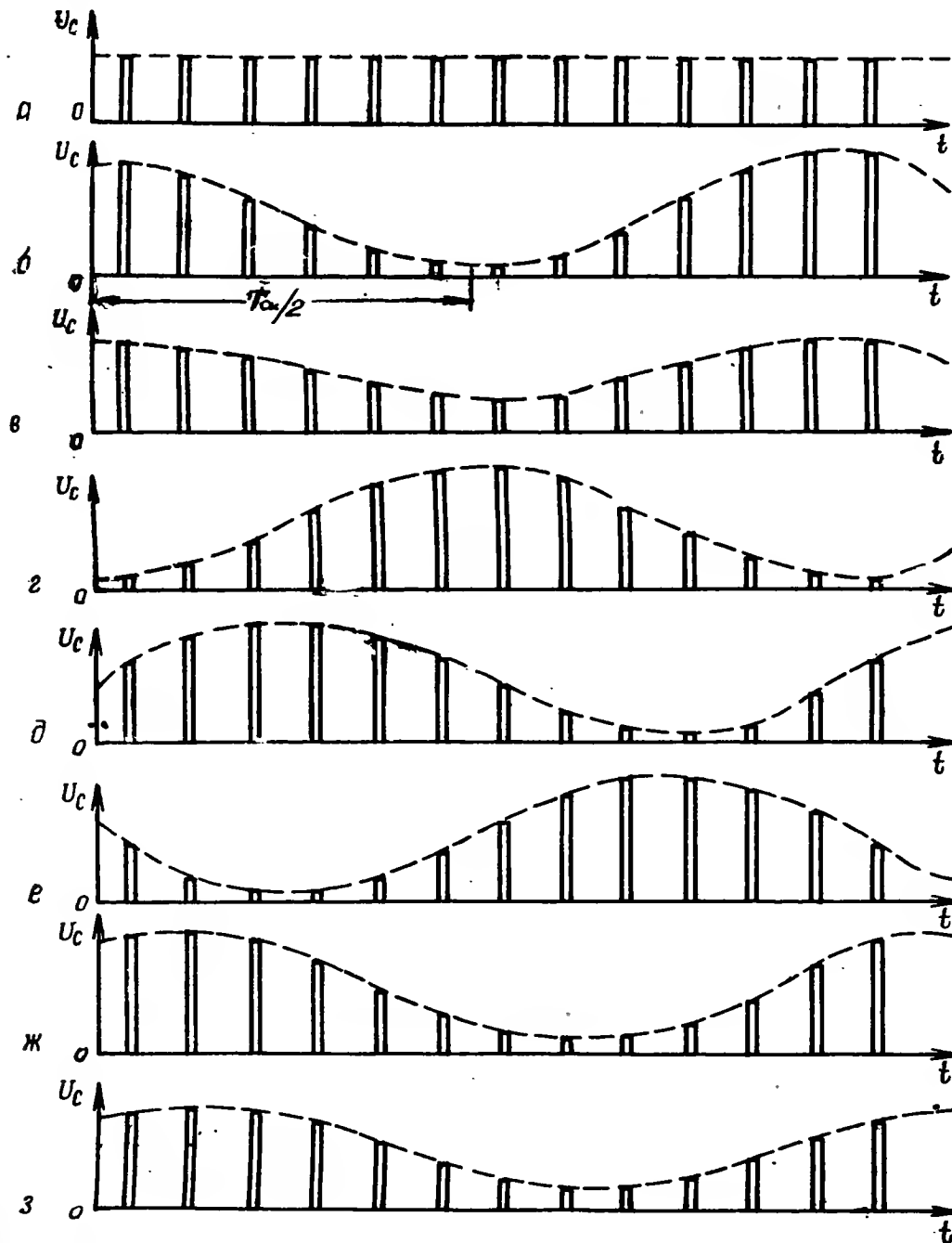


Рис. 6.34. Графики, поясняющие принцип действия системы АСН с коническим сканированием ДНА

плитуда сигнала на входе приемника будет максимальной $U_{m \max}$ (рис. 6.34, б). При вращении антенны положение максимума ДНА будет изменяться. Следовательно, амплитуда импульсов будет уменьшаться. Через интервал времени $t = 0,5T_{\text{ск}}$ ($T_{\text{ск}}$ — период сканирования антенны) ДНА займет нижнее положение, амплитуда импульсов на входе будет минимальной. Изменение амплитуды сигнала на входе приемника при одном из возможных положений цели в точках $C, A', B, B', Д$ и $Ц$ показано на рис. 6.34, в — з. Из рисунка 6.34 видно, что при отклонении цели от РСН сигнал на входе приемника будет промодулирован по амплитуде с частотой сканирования антенны $\Omega_{\text{ск}}$. Глубина модуляции m определяется величиной угла φ , а фаза огибающей импульсов — стороной отклонения цели от РСН.

Напряженность электрического поля у антенны РЛС

$$e(t) = E \cos(\omega_0 t + \psi_0); \quad (6.50)$$

$$nT_{\text{п}} \leq t \leq nT_{\text{п}} + \tau_{\text{и}}, \quad n = 0, 1, 2, \dots,$$

где ω_0 и ψ_0 — частота и фаза высокочастотного заполнения импульсов.

Угол между направлением на цель и максимумом ДНА в момент времени t равен $\varphi_p(t)$. Сигнал на входе приемника при работе антенны только на прием

$$u_{\text{вх}}(t) = U_{\text{мс}} F[\varphi_p(t)] \cos(\omega_0 t + \psi_0). \quad (6.51)$$

Здесь $F[\varphi_p(t)]$ — нормированная ДНА РЛС, $U_{\text{мс}}$ — амплитуда импульсов при $F(\varphi_p) = 1$ ($\varphi_p = 0$). Угол $\varphi_p(t)$ изменяется с частотой сканирования $\Omega_{\text{ск}}$. Для достаточно малых углов φ ($\varphi \ll \varphi_0$)

$$\varphi_p(t) \approx \varphi_0 - \varphi \cos(\Omega_{\text{ск}} t - \Psi_c).$$

В этом случае можно ограничиться двумя членами разложения функции $F[\varphi_p(t)]$ в ряд, т. е.

$$\begin{aligned} F[\varphi_p(t)] &= F(\varphi_0) + |F'(\varphi_0)| \varphi \cos(\Omega_{\text{ск}} t - \Psi_c) = \\ &= F(\varphi_0) [1 + k_F \varphi \cos(\Omega_{\text{ск}} t - \Psi_c)]. \end{aligned} \quad (6.52)$$

Мгновенное значение сигнала на входе приемника с учетом выражения (6.52)

$$\begin{aligned} u_{\text{вх}}(t) &= U_{\text{мс}} F(\varphi_0) [1 + k_F \varphi \cos(\Omega_{\text{ск}} t - \Psi_c)] \cos(\omega_0 t + \psi_0) = \\ &= U_{\text{мс}} F(\varphi_0) [1 + m \cos(\Omega_{\text{ск}} t - \Psi_c)] \cos(\omega_0 t + \psi_0). \end{aligned} \quad (6.53)$$

Здесь $U_{\text{мс}} F(\varphi_0)$ — амплитуда сигнала на входе приемника при совпадении направления на цель с РСН; $m = k_F \varphi$ — коэффициент амплитудной модуляции сигналов на входе приемника.

Из этого выражения следует, что при малых значениях φ последовательность принимаемых импульсных сигналов на входе антенны будет промодулирована по амплитуде частотой сканирования. При этом коэффициент амплитудной модуляции пропорционален углу отклонения направления на цель от РСН, а фаза оги-

бающей зависит от стороны отклонения. Принятый сигнал поступает в приемник, где осуществляются его преобразование и усиление. В приемнике имеется схема АРУ, с помощью которой среднее значение огибающей сигналов на выходе УПЧ поддерживается неизменным в широком диапазоне изменений амплитуд входных сигналов. Напряжение на выходе УПЧ

$$u_{\text{вых}}(t) = U_{m0} [1 + m \cos(\Omega_{\text{ск}} t - \Psi_c)] \cos(\omega_{\text{пр}} t + \psi_0 + \psi_r). \quad (6.54)$$

Последовательность данных импульсов поступает на амплитудный детектор. На его выходе формируются видеоимпульсы, амплитуда которых при $\varphi \neq 0$ изменяется по гармоническому закону с частотой $\Omega_{\text{ск}}$, т. е.

$$U_{\text{вых}}(t) = k_{\text{АД}} U_{m0} [1 + m \cos(\Omega_{\text{ск}} t - \Psi_c)]. \quad (6.55)$$

Указанная последовательность подается на схему выделения сигнала ошибки, состоящей из детектора огибающей (ДО) и селективного усилителя (СУ). На выходе селективного усилителя формируется гармонический сигнал (сигнал ошибки)

$$u_{\text{ош}}(t) = U_{m \text{ ош}} \cos(\Omega_{\text{ск}} t - \Psi_c), \quad (6.56)$$

амплитуда которого

$$U_{m \text{ ош}} = k_{\text{АД}} m k_1 U_{m0} = k_{\text{АД}} k_F \varphi k_{c0} U_{m0}$$

пропорциональна углу φ . Здесь k_{c0} — коэффициент передачи схемы выделения сигнала ошибки.

Сигнал ошибки поступает на фазовые детекторы азимута и угла места. В фазовых детекторах осуществляется операция перемножения и усреднения напряжений сигнала ошибки и опорных напряжений. Опорные напряжения $u_{\text{оп. аз}}$ и $u_{\text{оп. ум}}$ вырабатываются генератором опорного напряжения (ГОН). Время усреднения $T_{\text{ФД}}$ выбирается существенно большим $T_{\text{ск}}$. Управление ГОН производится двигателем сканирования (ДС), который обеспечивает также вращение облучателя антенны. Опорные напряжения, вырабатываемые ГОН, сдвинуты по фазе на 90° :

$$\left. \begin{aligned} u_{\text{оп. аз}}(t) &= U_{m \text{ оп}} \sin \Omega_{\text{ск}} t; \\ u_{\text{оп. ум}}(t) &= U_{m \text{ оп}} \cos \Omega_{\text{ск}} t. \end{aligned} \right\} \quad (6.57)$$

Напряжения на выходах фазовых детекторов

$$\left. \begin{aligned} U_{\text{ФД.аз}} &= k_{\text{пу}} \varphi \sin \Psi_c = k_{\text{пу}} \varphi_{\text{аз}}; \\ U_{\text{ФД.ум}} &= k_{\text{пу}} \varphi \cos \Psi_c = k_{\text{пу}} \varphi_{\text{ум}}, \end{aligned} \right\} \quad (6.58)$$

где $k_{\text{пу}} = k_F k_{\text{АД}} k_{c0} k_{\text{ФД}}$ U_{m0} — коэффициент передачи пеленгационных устройств каналов азимута и угла места.

Из выражения (6.58) видно, что выходные напряжения фазовых детекторов пропорциональны угловым отклонениям направления на цель от РСН в соответствующих плоскостях.

Напряжения с выходов фазовых детекторов подводятся к исполнительным устройствам азимутального и угломестного каналов,

которые автоматически поворачивают антенну в пространстве до тех пор, пока напряжения $U_{\text{ФД.аз}}$ и $U_{\text{ФД.ум}}$ не станут равными нулю. Недостатком систем АСН с коническим сканированием является подверженность воздействию случайных изменений амплитуды принимаемого сигнала.

6.12. Автоматическое сопровождение целей по скорости

Системы автоматического сопровождения целей по скорости (АСС) осуществляют поиск, селекцию, захват и автосопровождение цели по скорости, а также непрерывное измерение радиальной скорости цели.

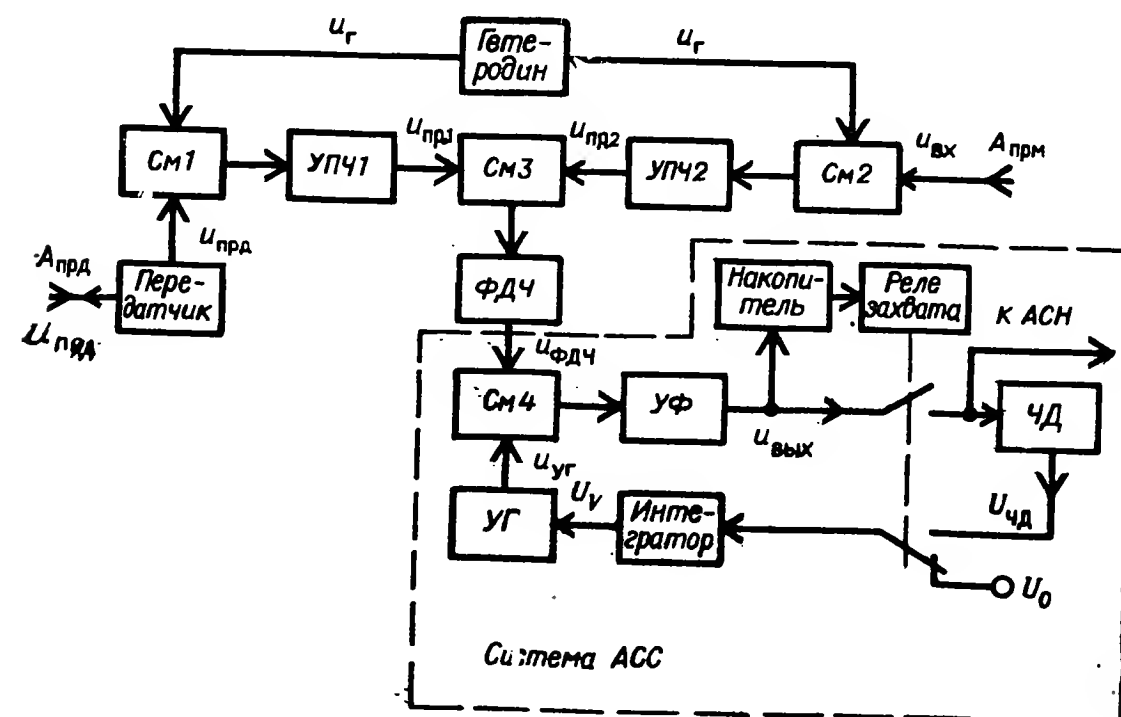


Рис. 6.35. Структурная схема системы АСС

Упрощенная схема высокочастотного тракта РЛС и системы АСС при непрерывном зондирующем сигнале изображена на рис. 6.35.

Передачик РЛС генерирует гармоническое колебание

$$u_{\text{прд}}(t) = U_{m \text{ прд}} \cos(\omega_0 t + \psi_0), \quad (6.59)$$

где $U_{m \text{ прд}}$ — амплитуда; ω_0 — несущая частота; ψ_0 — начальная фаза. Это колебание излучается передающей антенной. Отраженный от цели сигнал на входе приемника РЛС

$$u_{\text{вх}}(t) = U_{m \text{ вх}} \cos[\omega_0(t - \tau_D) + \psi_0 + \psi_{\text{отр}}], \quad (6.60)$$

$$\tau_D = \frac{2D(t)}{c} = \frac{2\left(D_0 - \int_0^t V_p(t) dt\right)}{c}.$$

Здесь τ_D — время запаздывания; а D_0 — начальная дальность до сопровождаемой цели.

При $V_p = \text{const}$

$$\tau_D = \frac{2(D_0 \mp V_p t)}{c}. \quad (6.61)$$

Подставив выражение (6.61) в (6.60), получим

$$u_{\text{вх}}(t) = U_{mc} \cos [(\omega_0 \pm \Omega_d) + \psi_0 + \psi_{\text{отр}} + \psi_{D_0}], \quad (6.62)$$

где $\psi_{D_0} = \frac{2D_0}{c} \omega_0$ — начальная фаза, обусловленная запаздыванием ЭМВ в момент перехода РЛС в режим автосопровождения цели; $\Omega_d = \frac{2V_p}{c} \omega_0$ — частота Доплера.

Прямой и отраженный сигналы после преобразования и усиления по промежуточной частоте $\omega_{\text{пр}}$ на выходах УПЧ будут иметь вид

$$\left. \begin{aligned} u_{\text{пр1}}(t) &= U_{m1} \cos(\omega_{\text{пр}} t + \psi_0 + \psi_r); \\ u_{\text{пр2}}(t) &= U_{m2} \cos[(\omega_{\text{пр}} \pm \Omega_d) t + \psi_0 + \psi_r + \psi_{\text{отр}} + \psi_{D_0}], \end{aligned} \right\} \quad (6.63)$$

где ψ_r — начальная фаза колебаний гетеродина.

Эти напряжения поступают на смеситель См3. Сигнал на входе фильтра доплеровских частот (ФДЧ) представляет собой колебание вида

$$u_{\text{ФДЧ}}(t) = k_{\text{ФД}} U_{m0} \cos(\Omega_d t + \Psi'_0), \quad (6.64)$$

где $\Psi'_0 = \Psi_{\text{отр}} + \Psi_{D_0}$, $k_{\text{ФД}}$ — коэффициент передачи ФДЧ.

Информация о радиальной скорости цели содержится в доплеровской частоте. Сигналы с выхода ФДЧ подводятся к смесителю См4, на второй вход которого подаются колебания $u_{\text{уп}}$ управляемого генератора. Система АСС может работать в режимах поиска и слежения.

В режиме поиска цели по скорости частота управляемого генератора изменяется от некоторого максимального значения $f_{\text{уп max}}$ до минимального значения $f_{\text{уп min}}$. Для этого на интегратор подается постоянное напряжение U_0 . На выходе интегратора вырабатывается изменяющееся по линейному закону напряжение U_v , под воздействием которого частота $f_{\text{уп}}$ управляемого генератора изменяется по линейному закону.

При изменении $f_{\text{уп}}$ разностная частота $f_p = f_{\text{уп}} - F_d$ сигнала на выходе смесителя См4 также будет изменяться. В момент времени, когда разностная частота становится равной частоте настройки селектирующего узкополосного фильтра, в схеме поиска и за-

хвата происходит амплитудное накопление подаваемых сигналов. Выходное напряжение накопителя сравнивается с пороговым $U_{\text{пор}}$.

Если накопленное напряжение превысит пороговое, то срабатывает реле захвата, которое отключает источник U_0 и подключает интегратор к выходу частотного детектора. Система АСС переходит в режим автосопровождения цели по частоте (скорости) Доплера.

В режиме слежения на частотный детектор поступают колебания с частотой $f_p = f_{\text{уф}}$ с выхода узкополосного фильтра.

При изменении радиальной скорости движения цели на выходе узкополосного фильтра появится сигнал с частотой $f_p \neq f_{\text{уф}}$. Частотный детектор преобразует частотное рассогласование $\Delta f =$

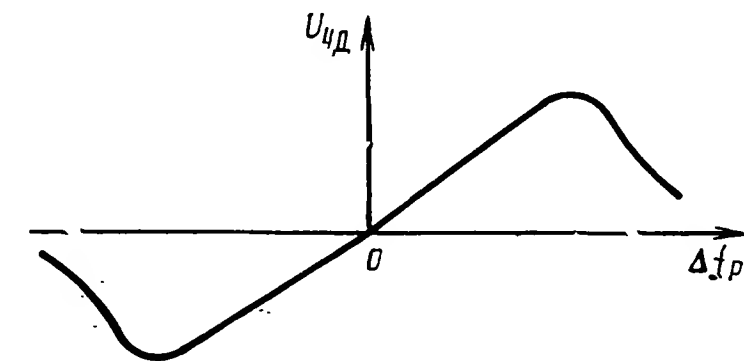


Рис. 6.36. Дискриминационная характеристика частотного детектора системы АСС

$= f_p - f_{\text{уф}}$ в напряжение $U_{\text{чд}}$, величина и знак которого однозначно определяются величиной и знаком расстройки Δf . Дискриминационная характеристика частотного детектора изображена на рис. 6.36. Рабочий участок характеристики при малых значениях Δf является линейной и нечетной функцией, проходящей через точку O . Напряжение $U_{\text{чд}}$ воздействует на интегратор и приводит к уменьшению или увеличению управляющего напряжения U_v . Под действием напряжения U_v изменяется частота управляемого генератора. В результате этого разностная частота изменяется и становится равной частоте настройки узкополосного фильтра $f_{\text{уф}}$. В режиме автосопровождения цели частота генератора $f_r = f_{\text{уф}} + F_d$ «следит» за изменением доплеровской частоты.

В режиме автоматического сопровождения система АСС представляет собой астатическую следящую систему с астатизмом первого порядка.

Селекция и разрешение сигналов по частоте (скорости) определяются полосой пропускания $\Delta f_{\text{уф}}$ узкополосного фильтра (шириной строга скорости). Разрешающая способность по скорости

$$\delta V_p = \frac{\Delta f_{\text{уф}}}{2} \lambda. \quad (6.65)$$

Сигнал, прошедший через узкополосный фильтр, несет также информацию об угловых координатах цели. Слежение по направлению осуществляется только за той целью, сигналы которой отселектированы системой АСС.

6.13. Принципы функционирования РЛС автоматического сопровождения целей

В системах управления оружием применяются РЛС автоматического сопровождения (слежения) целей (РЛС АСЦ). Указанные РЛС в зависимости от числа одновременно сопровождаемых целей делятся на одноцелевые и многоцелевые. В одноцелевых РЛС осуществляется слежение только за одной целью, в многоцелевых — за несколькими целями.

В применяемых на практике РЛС АСЦ используются режимы излучения сигналов: импульсный, непрерывный и квазинепрерывный. В импульсных РЛС производится слежение за целями по дальности и направлению, в РЛС с непрерывным излучением — по скорости и направлению, а с квазинепрерывным излучением — по дальности, скорости и направлению.

Рассматриваемые РЛС позволяют решать следующие задачи:

- производить поиск и обнаружение целей в заданном секторе пространства, в определенных диапазонах дальностей и радиальных скоростей целей;
- осуществлять селекцию, захват и автоматическое сопровождение обнаруженных целей;
- измерять координаты и параметры движения сопровождаемых целей.

РЛС АСЦ могут работать в двух режимах: в режиме поиска целей или в режиме автоматического сопровождения обнаруженной (выбранной) цели.

В режиме поиска работа РЛС АСЦ аналогична работе РЛС обнаружения. Обзор заданной области пространства производится антенной с узкой диаграммой направленности. В этом режиме представляется возможность наблюдать на экране индикатора РЛС отметки от всех целей, находящихся в зондируемой области пространства в пределах дальности действия РЛС.

Выбор (селекция) цели из множества наблюдаемых может быть осуществлен оператором или автоматически. При этом производится сначала захват целей и переход РЛС в режим АСЦ по одному из отслеживаемых параметров (например, по дальности или скорости), а затем по остальным параметрам (по угловым координатам). Принципы функционирования РЛС АСЦ различного типа рассмотрены ниже.

6.13.1. Принцип функционирования некогерентной импульсной РЛС АСЦ

Импульсная некогерентная РЛС АСЦ предназначена для непрерывного сопровождения цели по дальности и по направлению

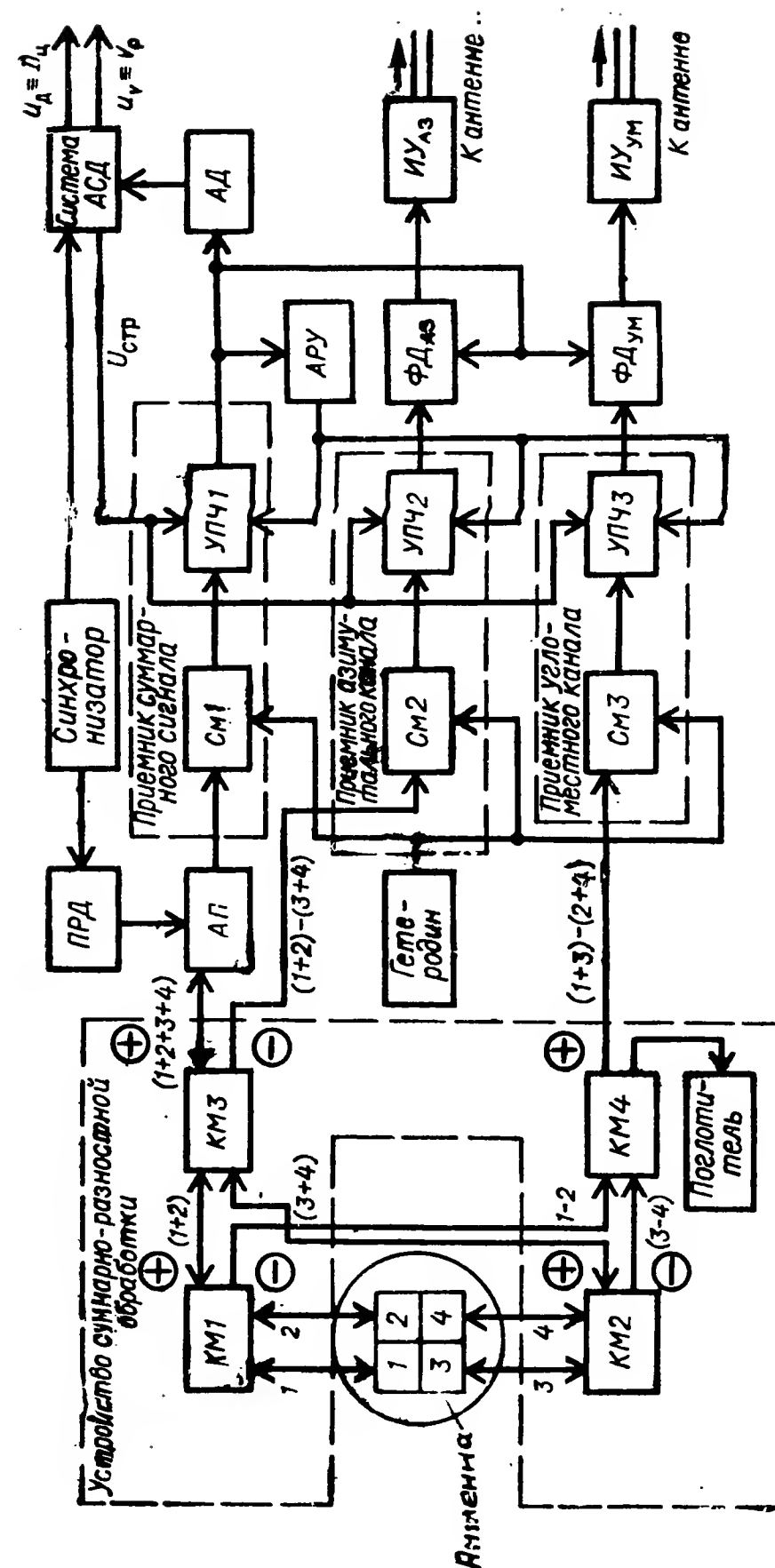


Рис. 6.37. Структурная схема моноимпульсной РЛС АСЦ

(угловым координатам), а также измерения ее параметров движения. Упрощенная структурная схема одноцелевой моноимпульсной РЛС АСЦ приведена на рис. 6.37.

Принцип функционирования РЛС в режиме слежения за целью состоит в следующем. Радиопульсы длительностью $\tau_{\text{и}}$, частотой повторения $F_{\text{п}}$ и частотой заполнения f_0 , вырабатываемые передатчиком (ПРД), через антенный переключатель (АП) и кольцевой мост КМЗ поступают на кольцевые мосты КМ1 и КМ2, запитывающие облучатели 1—4 синфазными сигналами равной мощности. Электромагнитная энергия, сфокусированная круговым параболическим отражателем, облучает цель. Сигнал, отраженный от цели, принимается антенной РЛС.

Из принятых радиосигналов в суммарно-разностном волноводном устройстве формируются сигналы суммарного и разностных (азимутального и угломестного) каналов. Суммарный сигнал на выходе каждого моста обозначен на схеме плюсом, а разностный — минусом. После преобразования по частоте и усиления суммарный сигнал детектируется по амплитуде в амплитудном детекторе (АД) и подается на временной различитель системы АСД. Система АСД осуществляет автосопровождение цели по дальности и формирование стробирующих импульсов, необходимых для стробирования суммарного и разностных приемников (УПЧ). Принцип действия импульсной системы АСД при некогерентной обработке принятых сигналов рассмотрен ранее.

Полоса пропускания приемников определяется их УПЧ:

$$\Delta f_{\text{пр}} = \frac{1}{\tau_{\text{и}}} \div 3. \quad (6.66)$$

Разностные сигналы азимутального и угломестного каналов после преобразования по частоте и усиления в УПЧ воздействуют на фазовые детекторы ФД_{аз} и ФД_{ум}. В качестве опорных сигналов ФД используются сигналы промежуточной частоты суммарного канала.

На выходах фазовых детекторов каналов азимута и угла места образуются постоянные напряжения, величина которых пропорциональна углу отклонения направления на цель от РСН (в соответствующей плоскости), а полярность — стороне отклонения (вправо-влево, вверх-вниз).

Эти напряжения (сигналы рассогласования) через исполнительные устройства ИУ_{аз} и ИУ_{ум} воздействуют на антенну так, что в установившемся режиме направление на цель совпадает с РСН.

В режиме автосопровождения РЛС следит за целью по дальности, радиальной скорости и направлению. При этом напряжения на выходах системы АСД пропорциональны дальности и радиальной скорости сближения цели с РЛС. Информация об угловых координатах цели и их производных может измеряться с помощью соответствующих датчиков, установленных на устройстве поворота антенны.

6.13.2. Принцип функционирования РЛС АСЦ с непрерывным излучением

РЛС с непрерывным излучением (РЛС с НИ) в режиме слежения позволяют осуществить селекцию целей по скорости (по частоте Доплера), захват и автоматическое сопровождение целей по скорости и направлению. Принцип функционирования одноцелевой РЛС с НИ и коническим сканированием ДНА поясняется структурной схемой, изображенной на рис. 6.38.

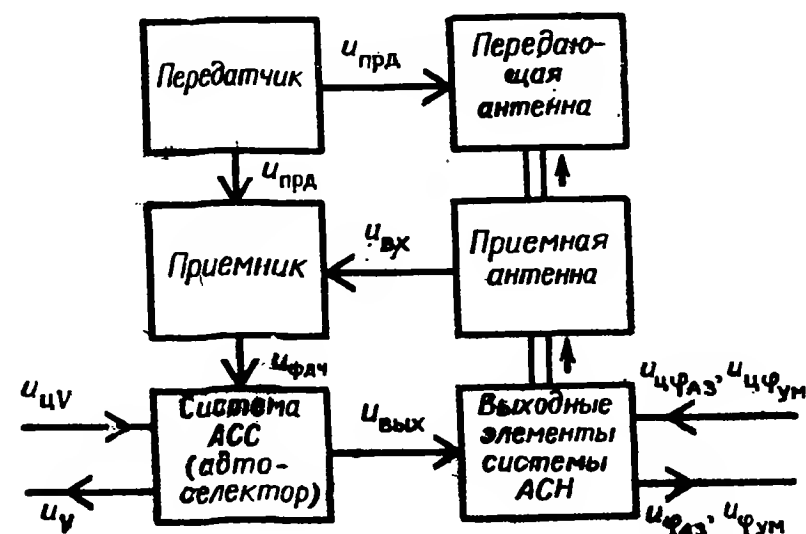


Рис. 6.38. Структурная схема РЛС АСЦ с непрерывным излучением

В РЛС с НИ передатчик и приемник работают одновременно. Для разделения зондирующих и отраженных сигналов используются две антенны. Если передатчик РЛС генерирует немодулированные синусоидальные колебания с частотой ω_0 , то частота сигнала, отраженного от i -й подвижной цели:

$$\omega_i = \omega_0 \pm \frac{2V_{pi}}{c} \omega_0 = \omega_0 \pm \Omega_{di}, \quad (6.67)$$

где V_{pi} — радиальная составляющая скорости i -й цели относительно РЛС.

Излучаемые и принимаемые сигналы поступают на смеситель приемника, на выходе которого действуют сигналы разностных (доплеровских) частот Ω_{di} . После усиления и фильтрации в фильтре доплеровских частот (ФДЧ) колебания с частотой Ω_{di} подводятся к системе АСС (рис. 6.35).

РЛС АСЦ с НИ работает в двух режимах: в режиме поиска (обнаружения) цели и в режиме ее автоматического сопровождения по скорости и направлению. При автоматическом поиске цели положение ДНА РЛС и частота перестраиваемого генератора системы АСС периодически изменяются в заданных диапазонах углов и доплеровских частот. Если в пределах ДНА находятся n

$$u_{\Phi \Pi \Psi}(t) = \sum_{i=1}^n U_{\Phi \Pi \Psi i} \cos(\Omega_{\Pi i} t + \Psi'_{0i}), \quad (6.68)$$

Поиск сигнала по частоте Доплера может производиться так, что в первую очередь осуществляются селекция и захват цели, летящей с наибольшей радиальной скоростью. С появлением на выходе узкополосного фильтра сигналов с частотой $\omega_p = \omega_{yf} = \omega_{пг} - \Omega_{дi \max}$ происходит их накопление, затем захват и перевод РЛС в режим слежения по скорости и направлению. Любое изменение радиальной скорости цели приводит к смещению по оси частот спектра отраженного сигнала, а следовательно, и частоты $\Omega_{дi}$. Это смещение будет отслеживаться системой АСС. При этом частота перестраиваемого генератора $f_{пг} = f_{yf} + F_{дi}$. Сигнал цели, отселектированный по частоте Доплера, подводится к системе АСН. Последняя обеспечивает непрерывное слежение за целью по направлению. В РЛС с НИ могут использоваться как моноимпульсные системы АСН, так и системы АСН с коническим сканированием.

6.13.3. Принцип функционирования РЛС АСЦ с квазинепрерывным излучением

В когерентных импульсных РЛС с большой скважностью сигналов проблема обнаружения и селекции подвижных целей на фоне Земли может быть решена, если $F_{\Pi} \geq 2F_{\text{д}} = 4V_{\text{р}}/\lambda$. Однако, если частота повторения импульсов РЛС $F_{\Pi} < 2F_{\text{д}}$, то частота огибающей видеоимпульсов на выходе фазового детектора $F_{\text{м}} < F_{\text{д}}$, а при $F_{\text{д}} = kF_{\Pi}$ ($k=1, 2, \dots$) $F_{\text{м}}=0$. В этом случае выделить



полезные сигналы на фоне отражений от Земли и осуществить селекцию подвижных целей затруднительно. Решение этой проблемы возможно с использованием РЛС с непрерывным или квазинепрерывным излучением (КНИ), в которых селекция полезных сигналов осуществляется по частоте Доплера. Использование РЛС с непрерывным излучением на самолетах ограничено из-за сложности развязки приемно-передающих трактов (просачивание зондирующих сигналов на вход приемника). В связи с этим в бортовых РЛС нашли широкое применение РЛС с квазинепрерывным излучением (КНИ, импульсно-доплеровские РЛС). В последних выполняется условие $F_{\Pi} \geq 2F_{\text{д max}}$ ($F_{\text{д max}}$ — максимально возможное значение доплеровской частоты). Поэтому частота огибающей видеоимпульсов на выходе фазового детектора равна частоте Доплера ($F_{\text{м}} = F_{\text{д}}$).

В РЛС АСЦ с КНИ возможны селекция и автоматическое слежение за целью по дальности, скорости сближения и направлению. Вариант упрощенной структурной схемы односторонней моноимпульсной РЛС такого типа приведен на рис. 6.39. Принцип действия передатчика РЛС поясняется графиками, изображенными на рис. 6.40.

В РЛС имеется высокостабильный задающий генератор (ЗГ), вырабатывающий колебания с частотами f_0 (рис. 6.40, а) и $f_{\Gamma} = f_0 + f_{\text{пр1}}$. Несущее колебание с частотой f_0 используется в передатчике при формировании когерентной последовательности зондирующих радиоимпульсов, а колебание с частотой $f_{\Gamma} = f_0 + f_{\text{пр1}}$

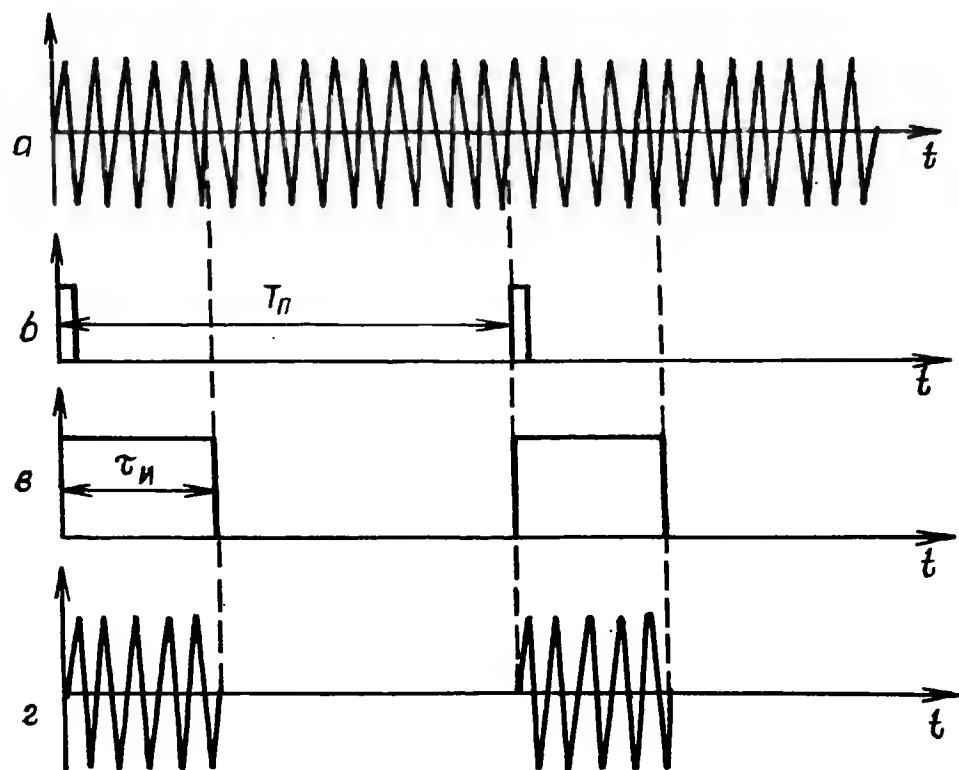


Рис. 6.40. Графики, поясняющие принцип действия передатчика РЛС АСЦ с квазинепрерывным излучением

($f_{\text{пр1}}$ — промежуточная частота) выполняет роль колебания гетеродина приемника.

Синхронизатор генерирует последовательность видеоимпульсов (рис. 6.40, б) с частотой повторения F_{Π} , которые нормализуются по длительности, форме и полярности в модуляторе. В результате на выходе модулятора формируется последовательность видеоимпульсов (рис. 6.40, в) с малой скважностью ($Q = T_{\Pi}/\tau_{\text{и}} = 5 \div 30$). Эта последовательность используется в усилителе мощности (УМ) в качестве модулирующих импульсов. После усиления и импульсной модуляции несущего колебания на выходе УМ образуется когерентная последовательность радиоимпульсов с малой скважностью (рис. 6.40, г).

В режиме обнаружения (поиска) цели осуществляется последовательный обзор пространства диаграммой направленности (ДН) антенны. В случае нахождения цели в пределах ДН на вход смесителя См1 приемника суммарного канала поступают отраженные сигналы u_{Σ} , которые преобразуются в промежуточную частоту $f_{\text{пр1}}$. Полоса пропускания УПЧ выбирается равной $\Delta f_{\text{пр}} = (1 \div 3)/\tau_{\text{и}}$. С выхода УПЧ когерентная последовательность радиоимпульсов подводится к системам АСС и АСД.

Принцип действия системы АСС с КНИ не отличается от принципа действия системы АСС с НИ.

При использовании КНИ отношение сигнал/шум на выходе УПЧ мало, поэтому реализация классической схемы временного различителя (ВР) системы АСД (измерение дальности осуществляется по огибающей радиоимпульсов, на схемы «И» временного различителя подаются видеоимпульсы с выхода приемника) нецелесообразно. Это объясняется тем, что при малом отношении сигнал/шум происходит существенное подавление полезного сигнала в АД.

В РЛС с КНИ временной различитель строится так, что селекторы дальностей с ранним и поздним селекторными импульсами устанавливаются в тракте промежуточной частоты. После селекторов дальности производится когерентное накопление импульсов (узкополосная фильтрация), а затем выделение разностного сигнала.

Рассмотрим принцип действия системы АСД РЛС с КНИ при однозначном измерении дальности.

Ранний $U_{\text{р}}$ и поздний $U_{\text{п}}$ селекторные импульсы, вырабатываемые генератором полустробов (ГПС), воздействуют на селекторы дальностей D_1 и D_2 . После стробирования принимаемого суммарного сигнала на выходах селекторов D_1 и D_2 образуются радиоимпульсы одинаковой длительности ($\tau_1 = \tau_2$), если ось симметрии принимаемого импульса (задержка его $\tau_D \equiv D_{\text{ц}}$) совмещена с осью симметрии селекторных импульсов (задержка оси симметрии селекторных импульсов $\tau_c = \tau_D$).

Если оси симметрии импульсов не совпадают ($\tau_D \neq \tau_c$), то длительности радиоимпульсов на выходах селекторов D_1 и D_2 будут разными ($\tau_1 \neq \tau_2$). Разность длительностей импульсов пропорцио-

нальна временной ошибке: $\tau_{\text{ош}} = \tau_D - \tau_c = k_1 (\tau_1 - \tau_2)$, где k_1 — постоянный коэффициент.

После преобразования в смесителях См2 и фильтрации узкополосными фильтрами (УФ) каналные сигналы детектируются по амплитуде и подаются на вычитающее устройство. На его выходе формируется сигнал рассогласования постоянного тока $U_{\text{вр}} = k_2 \tau_{\text{ош}}$, где k_2 — постоянный коэффициент.

УФ системы АСД аналогичен УФ системы АСС. Полоса его пропускания выбирается в пределах $\Delta f_{\text{УФ}} = 200 \div 1000$ Гц.

В режиме слежения напряжение $U_{\text{вр}}$ воздействует через интегратор на цепь управляемой временной задержки (ЦУВЗ), изменяя задержку синхронизирующих импульсов. Последовательность задержанных синхронизирующих импульсов используется для выработки в генераторе полустробов (ГПС) селекторных импульсов U_p и $U_{\text{п}}$.

В режиме слежения система АСД работает так, что ось симметрии стробирующих импульсов следит за перемещением оси симметрии полезного сигнала. В этом случае $\tau_D = \tau_c$ и напряжение на выходе интегратора U_D является пропорциональным дальности до цели.

В результате суммирования раннего и позднего селекторных импульсов в сумматоре Σ образуется стробирующий импульс $U_{\text{стр}}$, который используется для стробирования УПЧ суммарного и разностных каналов системы АСН.

В режиме поиска цели частота колебаний управляемого генератора (УГ) системы АСС и задержка стробирующего импульса $U_{\text{стр}}$ системы АСД под действием постоянных напряжений U_1 и U_2 изменяются в пределах возможных частот Доплера и интервалов запаздывания отраженных сигналов.

В момент появления сигнала на выходе УФ системы АСС на вход обнаружителя будут поступать сигналы, отраженные от цели, которые накапливаются в накопителе обнаружителя. При превышении соответствующего уровня срабатывает реле захвата и системы АСД и АСС переходят в режим автоматического сопровождения цели по дальности и скорости.

С момента захвата цели на автосопровождение по дальности и скорости начинается автосопровождение цели и по направлению.

Так как в РЛС с КНИ $T_{\text{п}} < 2D_{\text{п max}}/c$, возникает проблема однозначного измерения дальности до цели. Однозначность измерения дальности может быть обеспечена использованием переменной частоты повторения радиоимпульсов $T_{\text{п}}$. С этой целью может применяться также амплитудная и частотная модуляция излучаемых колебаний низкочастотным синусоидальным напряжением.

В режиме слежения система АСД вырабатывает стробирующие импульсы $U_{\text{стр}}$, временное положение которых соответствует моменту прихода отраженных от цели сигналов. Эти импульсы открывают кроме суммарного канала два разностных канала приемника (азимутальный и угломестный). Разностные сигналы формируются устройством суммарно-разностной обработки, выполненно-

го на волноводных кольцевых мостах. При нахождении цели на РСН эти сигналы равны нулю.

После усиления в УПЧ разностные сигналы с частотой $f_{\text{пр1}} + F_d$ преобразуются в смесителях См2 на промежуточную частоту $f_{\text{пр2}}$ и фильтруются узкополосными фильтрами. В качестве опорного сигнала в См2 используется колебание следящего управляемого генератора УГ системы АСС. Разностные сигналы с выходов УФ воздействуют на фазовые детекторы (ФД) каналов азимута и угла места. На другие входы ФД воздействует отселектированный по скорости системой АСС суммарный сигнал с частотой $f_{\text{пр2}}$. Сигналы рассогласования, пропорциональные углу отклонения цели относительно РСН через исполнительные устройства ИУ_{аз} и ИУ_{ум} воздействуют на антенну, сводя угловое рассогласование к нулю. Полоса пропускания приемников скоростного, дальномерного и угломерного каналов одинакова. Она определяется полосой пропускания узкополосных фильтров УФ и составляет сотни герц.

Глава 7. РАДИОНАВИГАЦИОННЫЕ СРЕДСТВА

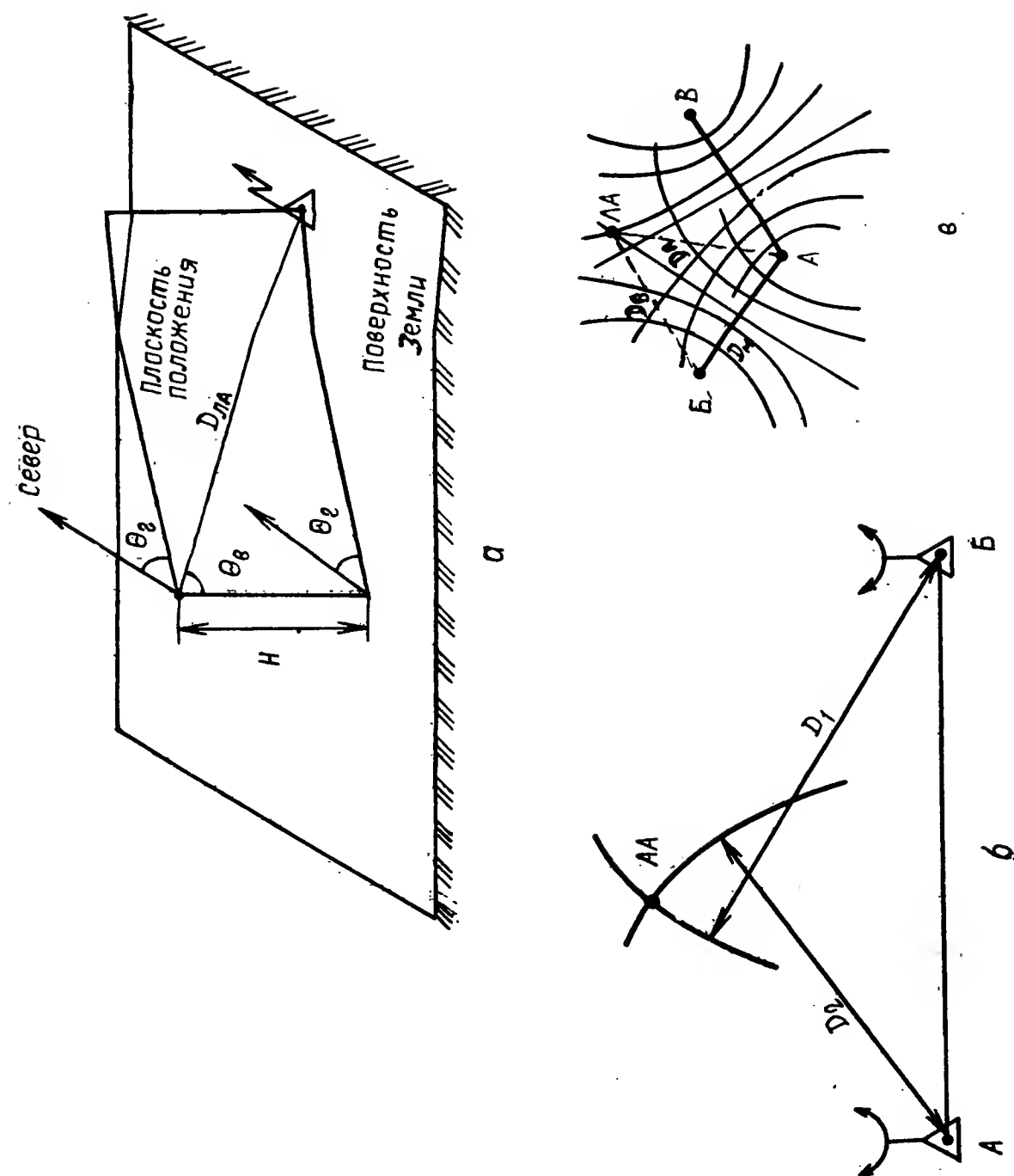
7.1. Решаемые задачи и классификация радионавигационных средств

Основная задача радионавигации — обеспечение полета летательного аппарата (ЛА) по заданному маршруту с требуемыми параметрами (скоростью, высотой). Кроме того, радионавигационные средства обеспечивают экипаж ЛА информацией о посадочном курсе и положении ЛА относительно оптимальной кривой снижения самолета вплоть до визуальной видимости взлетно-посадочной полосы (ВПП).

Для решения указанных задач навигации и пилотирования на ЛА устанавливаются навигационные средства, объединенные в пилотажно-навигационный комплекс (ПНК). Радионавигационные средства являются в ПНК основными источниками информации о маршруте и режиме полета ЛА. Радионавигационные системы (РНС) могут включать в свой состав только бортовые навигационные средства или бортовые и наземные навигационные средства (наземные приводные радиостанции, радиомаяки и др.). В первом случае РНС называют автономными, а во втором — неавтономными. Задачи самолетовождения могут быть успешно решены, если экипаж непрерывно получает данные о пространственном положении ЛА, положении вектора путевой скорости (относительно Земли) и воздушной скорости (относительно перемещающихся масс воздуха).

Известно, что положение точки в пространстве однозначно определяется заданием трех ее координат, а скорость передвижения точки — производными по этим координатам. Поэтому радионавигационные средства определяют три так называемые поверхности положения летательного аппарата. Их пересечение отождествляет-

Рис. 7.1. Линии положения РНС: угломерной (а); дальномерной (б); разностно-дальномерной (в)



ся с положением ЛА. Поверхностью положения называют геометрическое место точек, при нахождении в которых измеряемый радионавигационный параметр будет оставаться постоянной величиной.

В соответствии с этим все радионавигационные измерители можно разделить на угломерные, дальномерные и разностно-дальномерные.

Угломерные системы обеспечивают измерение направления из точки приема на передающую радиостанцию. К ним относятся: самолетные радиопеленгаторы (например, радиокомпасы), измеряющие направление (пеленг) на наземную радиостанцию; наземные пеленгаторы, определяющие направление на ЛА по излучению радиостанции, установленной на нем; наземные радиомаяки с направленными диаграммами излучения и приемные радиоустройства на борту ЛА.

Пеленг Θ_r на источник излучения будет оставаться постоянным, если ЛА перемещается в плоскости, проходящей через источник излучения и вертикаль, опущенную из точки ЛА на землю (рис. 7.1, а). При этом естественно, что в вертикальной плоскости пеленг радиостанции (Θ_b) будет меняться.

Так как практически дальность до маяка $D_{ЛА}$ существенно больше высоты полета самолета (H), направление на маяк в вертикальной плоскости Θ_b можно не измерять (оно будет мало меняться при изменении положения ЛА). За геометрическое место точек положения ЛА в этом случае можно принять линию пересечения плоскости положения с поверхностью земли. Таким образом, измерение Θ_r угломерным устройством позволяет задать одну из линий положения ЛА.

Для определения местоположения самолета одновременно или с малым временным интервалом необходимо измерять направления на два маяка — Θ_{r1} и Θ_{r2} .

В дальномерных радионавигационных системах для определения места ЛА используются маяки-ответчики, устанавливаемые на земле в точках, координаты которых на ЛА известны. На ЛА устанавливается запросчик. Измеряемым параметром радиосигнала в данном случае является время запаздывания между моментом излучения запросного и приемом ответного сигнала

$$\tau_3 = \frac{2D_{ЛА}}{c}.$$

Очевидно, что значению $\tau_3 = \text{const}$ будет соответствовать сфера с центром в точке установки маяка-ответчика. Но так как $D_{ЛА} \gg H$, за геометрическое место точек положения ЛА принимают линию пересечения сферы с поверхностью земли — окружность. Два маяка-ответчика позволяют определить место ЛА как точку пересечения двух окружностей (рис. 7.1, б) и поверхности Земли.

Для определения линии положения ЛА в разностно-дальномерных системах используются два синхронно ра-

ботающих наземных передатчика (рис. 7.1, в), расположенных в точках A и B . Одна из этих станций является ведущей (например, A), а другая — ведомой. Сигнал станции A принимается на ЛА и в точке B . Из точки B (ведомой станции) он переизлучается со строго фиксированной задержкой и также принимается на ЛА. Измеряемым параметром радиосигнала является время относительного запаздывания сигналов.

$$\tau_3 = \tau_k + \frac{1}{c} (D_M + D_B - D_A),$$

где τ_k — известная задержка сигнала в станции B . Так как τ_k и $\tau_M = D_M/c$ известны, для построения линии положения используется $\tau'_3 = (D_B - D_A)/c$. Известно, что геометрическое место точек, соответствующее $\tau'_3 = \text{const}$, представляет собой гиперболу с фокусом в точке A при $D_B > D_A$ и в точке B при $D_B < D_A$, поэтому разностно-дальномерные системы иначе называют гиперболическими.

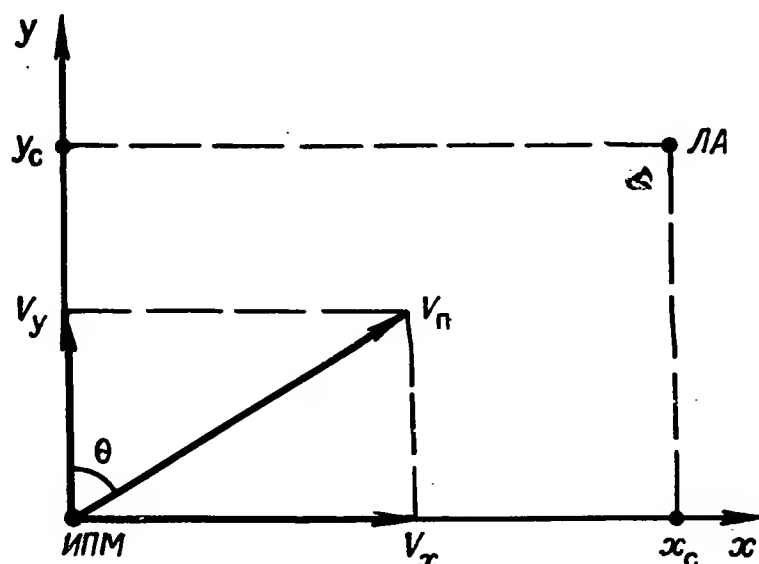


Рис. 7.2. К пояснению принципа действия счислителя пути

Для определения местоположения ЛА в плоскости Земли разностно-дальномерная система должна иметь минимум три станции: ведущую A и две ведомые B и C . Для решения задач навигации в состав РНС включают два навигационных измерителя различных типов, например угломерное и дальномерное. Данные РНС называют угломерно-дальномерными. Не исключено и другое сочетание разнотипных измерителей линий (поверхностей) положения.

Второй класс РНС составляют измерители, основанные на счислении пути, пройденного ЛА от момента взлета или от момента включения системы (рис. 7.2). Пусть в исходном пункте маршрута (ИПМ) включена РНС, использующая информацию об истин-

ной (относительно Земли) скорости ЛА. Скорость ЛА характеризуется модулем $V_n = |\vec{V}_n|$ и направлением Θ относительно некоторого фиксированного направления, например направления на север. Тогда путь, пройденный ЛА в прямоугольной системе координат, будет определяться как

$$\left. \begin{aligned} y_n(t_n) &= \int_0^{t_n} V_n(t) \cos \Theta_n(t) dt; \\ x_n(t_n) &= \int_0^{t_n} V_n(t) \sin \Theta_n(t) dt, \end{aligned} \right\} \quad (7.1)$$

где t_n — момент определения местоположения ЛА.

Очевидно, что в состав такой навигационной системы должны входить измерители модуля скорости V_n , его положения в выбранной системе координат (Θ_n) и два интегратора — счислителя пройденного пути.

Для измерения V_n используют доплеровский измеритель скорости (ДИСС), а для измерения Θ_n — курсовую систему, например гироскопический или гироманитный компас.

Кроме того, для определения местоположения ЛА могут использоваться бортовые РЛС обзора земной поверхности (так называемые панорамные РЛС). Если на земле с помощью РЛС будет обнаружен объект, например маяк-ответчик, положение которого известно, местоположение ЛА будет однозначно определено.

Носителем информации о том или ином навигационном параметре является однозначно связанный с ним параметр принимаемого сигнала. В соответствии с этим все РНС делят на следующие группы:

$$\begin{aligned} e(t) &= E(x) \sin(\omega_0 t + \varphi_0) && \text{— амплитудные;} \\ e(t) &= E \sin[\omega(x)t + \varphi_0] && \text{— частотные;} \\ e(t) &= E \sin[\omega_0 t + \varphi(x)] && \text{— фазовые;} \\ e(t) &= E[t - \tau_3(x)] \sin(\omega_0 t + \varphi_0) && \text{— временные.} \end{aligned}$$

В амплитудных, частотных и фазовых РНС информацию о навигационном параметре выделяют соответственно из амплитуды, частоты и фазы принимаемого сигнала.

Временные РНС используют зависимость запаздывания τ_3 отгибающей (импульсов) относительно фиксируемого момента времени, поэтому их чаще называют импульсными.

На современном ЛА устанавливается достаточно большое количество навигационных средств, в том числе и нерадиотехнических: магнитные, гироскопические и гироманитные компасы, инерциальные счислители пути и т. д. Поэтому местоположение ЛА может быть определено одновременно и независимо несколь-

кими измерителями. Вполне естественным является стремление повысить эффективность решения навигационных задач за счет использования данных о местоположении ЛА и параметрах его полета, получаемых с помощью измерителей различного типа. Для измерения одного или двух навигационных параметров возможно определение двух и более параметров электрического сигнала, например временного сдвига огибающей и приращения фазы (фазовые разностно-дальномерные системы). Эта задача решается путем объединения и совместной обработки данных, получаемых различными измерителями в так называемых комплексных системах навигации. РНС входят в них в качестве одной из составных частей. Совместная обработка навигационных параметров осуществляется с помощью бортовой цифровой вычислительной машины (БЦВМ).

Комплексирование измерительных устройств систем навигации позволило существенно (в несколько раз) повысить точность определения местоположения скорости движения ЛА. Одновременно повышается и помехоустойчивость навигационных комплексов, так как подавление помехами одного или даже нескольких навигационных РЭС не лишает экипажа самолета информации о навигационных параметрах, а только снижает точность их определения.

Любая неавтономная РНС имеет ограниченную зону действия. Под последней понимают ту область пространства, в которой навигационный параметр определяется с допустимой ошибкой. По этому показателю все РНС делят на системы ближней радионавигации (РСБН), для которых $D_{\max} \leq 400$ км, и на радиосистемы дальней навигации (РСДН), для которых зона действия составляет тысячи километров.

7.2. Принципы построения радионавигационных измерителей

7.2.1. Угломерные РНС

Направление на источник излучения (приводную радиостанцию) может быть определено на борту ЛА путем пеленгации этого источника с помощью автоматического угломерного устройства средневолнового диапазона, называемого автоматическим радиоконпасом (АРК). Все без исключения самолеты и вертолеты снабжены АРК. Рассмотрим принцип его действия.

Для этого обратимся к рис. 7.3, где изображена упрощенная функциональная схема АРК. В современных АРК антенная система состоит из двух ортогонально расположенных рамок, подключенных к неподвижным обмоткам гониометра, и ненаправленной антенны. Рассмотрим работу рамочной антенны с гониометром (рис. 7.4). Рамочная антенна состоит из двух одинаковых рамок, навитых на ферромагнитный сердечник. Оси рамок повернуты на 90° . Одна из них ориентирована по измерительной оси (x), совпадающей с продольной осью ЛА.

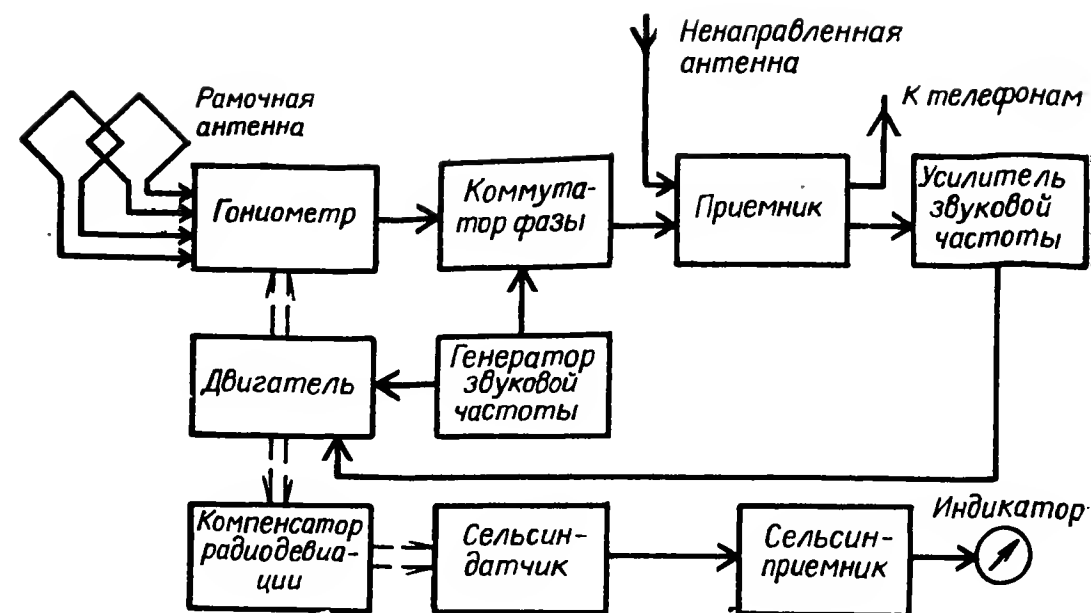


Рис. 7.3. Структурная схема радиоконпаса

Если пеленгуемая радиостанция работает плоскополяризованной волной, вертикальная составляющая поля которой $E_v \neq 0$, то в вертикально расположенных витках рамки будет наводиться ЭДС. Выводы рамки к нагрузке (в данном случае — к неподвижным обмоткам гониометра) подключены встречно.

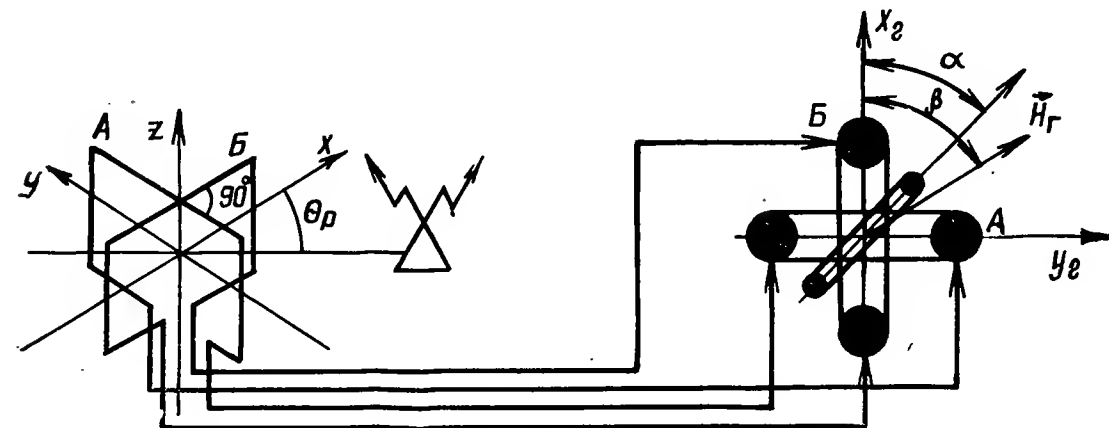


Рис. 7.4. К пояснению принципа действия двухрамочной антенны АРК

Если направление на пеленгуемую радиостанцию нормально к плоскости рамки Б ($\theta_p = 90^\circ$), в каждой из вертикальных ее сторон будут наведены одинаковые по величине и фазе ЭДС и ток в неподвижной обмотке Б гониометра будет равен нулю. Если же окажется, что $\theta_p \neq 0$, электромагнитная волна, распространяясь от одной стороны рамки к другой, запаздывает на τ_p и между ЭДС, наводимыми в сторонах рамки, возникает разность фаз $\varphi = \omega_0 \tau_p$, где ω_0 — несущая частота принятого сигнала. Выводы рамки окажутся неэквипотенциальными, и по обмотке гониометра потечет ток. Этот ток будет пропорционален $\cos \theta_p$, так что для

рамки B зависимость амплитуды тока в катушке гониометра B от Θ_p будет иметь вид

$$I_{mB} = I_{m0} \cos \Theta_p. \quad (7.2)$$

Рамки и катушки гониометра одна относительно другой повернуты на 90° , поэтому для рамки и катушки A

$$I_{mA} = I_{m0} \sin \Theta_p.$$

Таким образом, диаграммы направленности для рамок можно записать в виде

$$F_{pA} = F_0 \sin \Theta_p;$$

$$F_{pB} = F_0 \cos \Theta_p.$$

Форма F_{pA} приведена на рис. 7.5.

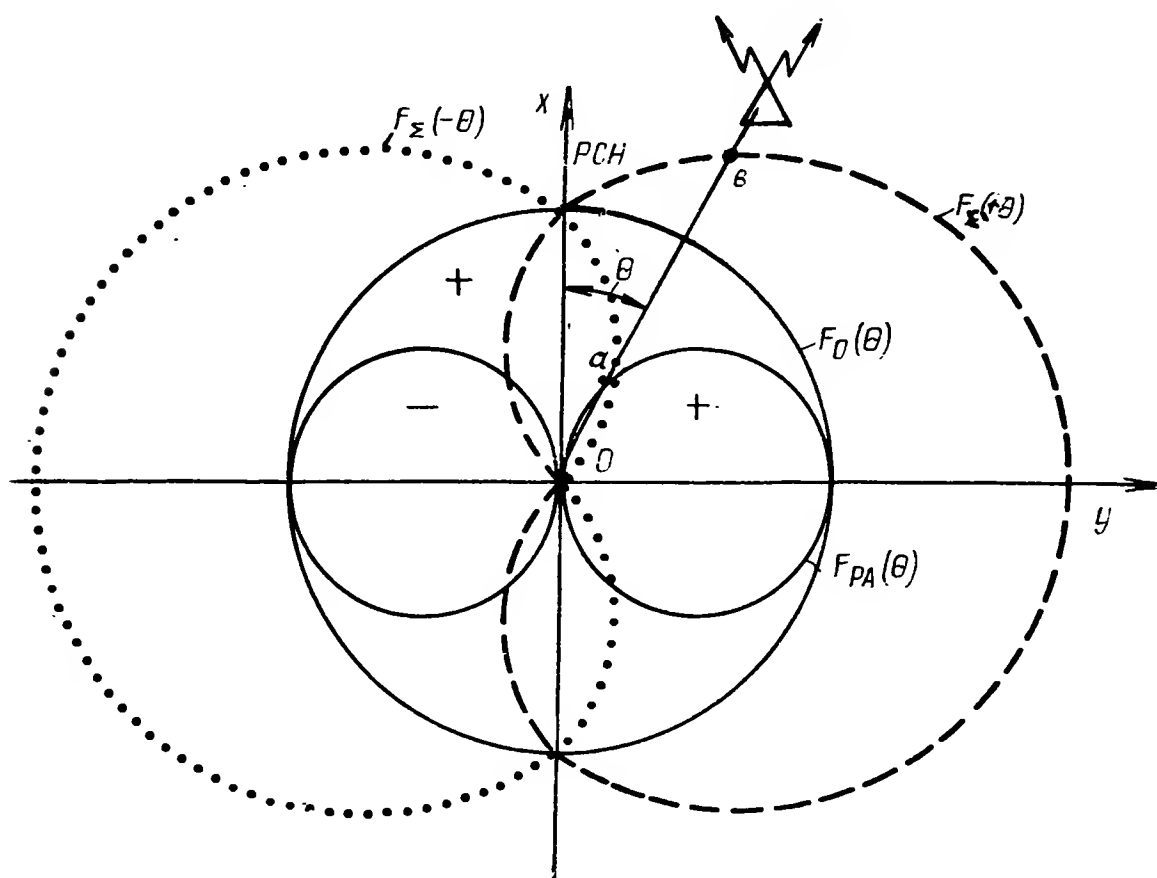


Рис. 7.5. Диаграмма направленности двухрамочной антенны с гониометром

В силу симметрии схемы, а также вследствие специальных мер токи в катушках гониометра практически синфазны. Создаваемые этими токами переменные электромагнитные поля в подвижной катушке будут наводить ЭДС, отображающую своей амплитудой величину Θ_p , а фазой — направление на источник относительно РСН.

Так как катушки повернуты в пространстве на 90° , а питаются синфазным напряжением, направления векторов магнитного поля

катушек A и B будут ортогональными, а их фазы совпадают. Поэтому модуль результирующего вектора \vec{H}_r (рис. 7.4) при приеме синусоидального сигнала

$$|\vec{H}_r| = \sqrt{H_A^2 \sin^2 \Theta_p \cos^2 \omega_0 t + H_B^2 \cos^2 \Theta_p \cos^2 \omega_0 t}.$$

При $H_A = H_B$

$$|\vec{H}_r| = H_0 \cos \omega_0 t.$$

Наводимая в подвижной катушке ЭДС зависит как от $|\vec{H}_r|$, так и от ориентации фронта волны относительно этой катушки. Из рис. 7.4 следует, что наводимая в подвижной катушке ЭДС

$$e_n(t) = -\frac{d\Phi_r(t)}{dt} = E_m \sin(\beta - \alpha) \sin \omega_0 t.$$

Угол β может быть определен по формуле

$$\tan \beta = H_A \sin \Theta_p / H_B \cos \Theta_p = \tan \Theta_p.$$

Следовательно, ЭДС на выходе подвижной рамки, характеризующая диаграмму направленности рамочной антенны, будет определяться выражением

$$e_n(t) = E_m \sin(\Theta_p - \alpha) \sin \omega_0 t. \quad (7.3)$$

В этом сигнале закодирована информация о модуле и знаке Θ_p . Зависимость амплитуды $E_{mm} = E_m \sin(\Theta - \alpha)$ характеризуется той же кривой, что и для одиночной рамки, но при повороте последней на угол α , т. е. поворот подвижной катушки P эквивалентен повороту одиночной рамки на угол α .

Если в выражении (7.3) положить $\alpha = \Theta$, то E_{mm} . Следовательно, приняв в качестве РСН направление $\Theta - \alpha = 0$, можно с помощью рамочной антенны (правда, неоднозначно) определить пеленг радиостанции. Так как $\sin(-\alpha) = -\sin \alpha$, при неподвижной катушке ($\alpha = \text{const}$) смена знака аргумента $\Theta - \alpha$ (переход пеленгуемого источника справа налево относительно РСН) приводит к смене начальной фазы ЭДС рамки на 180° .

Рассмотрим дальнейшие преобразования сигналов в АРК, для чего вновь обратимся к рис. 7.3. Суммарная диаграмма направленности антенной системы АРК формируется путем суммирования сигнала ненаправленной антенны $e_0 = E_{m0} \sin \omega_0 t$ с сигналом рамки на входе приемника. Перед суммированием сигнал с выхода гониометра проходит через коммутатор фазы, управляемый колебаниями генератора звуковой частоты $F_{ГЗЧ}$. В течение полупериода этих колебаний фаза сигнала (7.3) сохраняется, а на втором полупериоде — меняется на π . Иными словами, на половине периода $T_{ГЗЧ} = 1/F_{ГЗЧ}$ сигналы e_n и e_0 суммируются, формируя диаграмму $F_\Sigma(+\Theta)$, а на половине периода $F_\Sigma(-\Theta)$ меняют свою ориентацию на 180° (рис. 7.5).

Если источник излучения отклонен от равносигнального направления на угол Θ_p , принимаемый сигнал оказывается промодулиро-

ванным по амплитуде с той же частотой $F_{ГЗЧ}$ и глубиной модуляции, определяемым по формуле:

$$m_c = \frac{os - oa}{os + oa}.$$

Фаза φ_c огибающей сигнала, сформированного таким образом относительно фазы колебаний ГЗЧ, меняется на 180° при переходе направления на маяк через РСН.

В приемнике АМ-сигнал усиливается и детектируется по амплитуде. Выделенная огибающая сигнала

$$U_{от}(t) = U(m_c) \cos(\Omega_{ГЗЧ}t - \varphi_c),$$

где $\varphi_c = 0$ или π в зависимости от направления прихода ЭМВ. После усиления $U_{от}(t)$ поступает на управляющую обмотку двигателя поворота подвижной рамки гониометра. Возбуждающая обмотка двигателя питается непосредственно с выхода ГЗЧ. Смена фазы огибающей приводит к изменению направления вращения двигателя. Поэтому при правильной фазировке питания обмоток двигателя его работа приведет к тому, что разность $(\Theta_p - \alpha) \rightarrow 0$, а вместе с тем и $U(m_c) \rightarrow 0$.

Через дистанционную систему передачи угла (сельсин-датчик и сельсин-приемник) угол поворота подвижной рамки отображается стрелкой указателя АРК, выдавая летчику информацию о курсовом угле радиостанции.

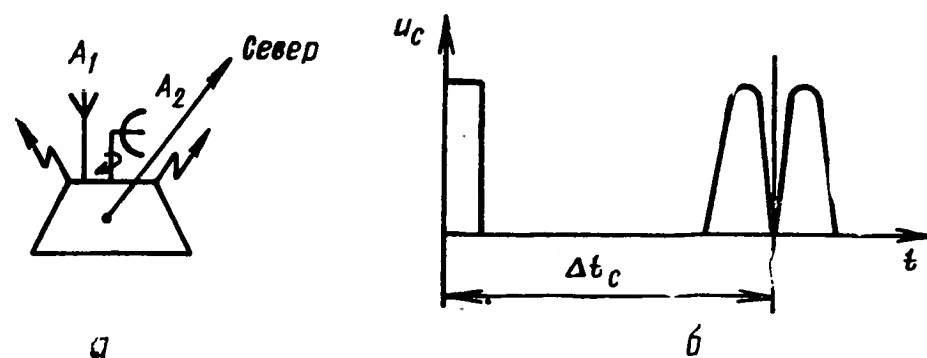


Рис. 7.6. К пояснению принципа действия угломерного канала РСБН:

наземный маяк-ответчик (а); временные графики сигналов на выходе приемника (б)

Наряду с рассмотренным АРК средневолнового диапазона в авиации находят применение радиоконпасы, работающие в УКВ-диапазоне. Их используют для межсамолетной навигации, например для обеспечения встречи ударного самолета с заправщиком.

Второй тип угломерных устройств — с направленными маяками — используется во всех РСБН. Здесь (рис. 7.6, а) радиомаяк-ответчик имеет ненаправленную (A_1) и направленную (A_2) антенны. При этом A_2 вращается со строго фиксированной угловой ско-

ростью $\Omega_{ск}$. В тот момент, когда ось антенны маяка направлена на север, маяк (через ненаправленную антенну) излучает кодированный сигнал «север». Таким образом, огибающие сигналов на выходе самолетного приемника РСБН будут иметь вид, показанный на рис. 7.6, б. Для повышения точности определения направления диаграмму направленности антенны маяка делают двухлепестковой, а иногда и многолепестковой, например в системе «Такан». Измеритель фиксирует интервал времени (запаздывание) Δt_c между началом сигнала «север» и центром сигнала, полученного за счет приема излучения направленной антенны маяка. Очевидно, что азимут самолета относительно маяка

$$\Theta_n = 2\pi \frac{\Delta t_c}{T_{ск}}, \quad (7.4)$$

где $T_{ск}$ — период вращения диаграммы.

7.2.2. Дальномерные и угломерно-дальномерные РНС

Принцип дальнометрии используется во всех высотомерах. Для измерения больших высот $H \geq 300$ м используют импульсные дальнометры (радиовысотомеры).

Так как на время излучения импульса длительностью τ_n приемник радиовысотомера (РВ) парализуется, для измерения малых высот $H < 300$ м импульсные РВ непригодны. РВ малых высот используют частотно-модулированные сигналы. Закон изменения частоты зондирующего сигнала во времени показан на рис. 7.7, б

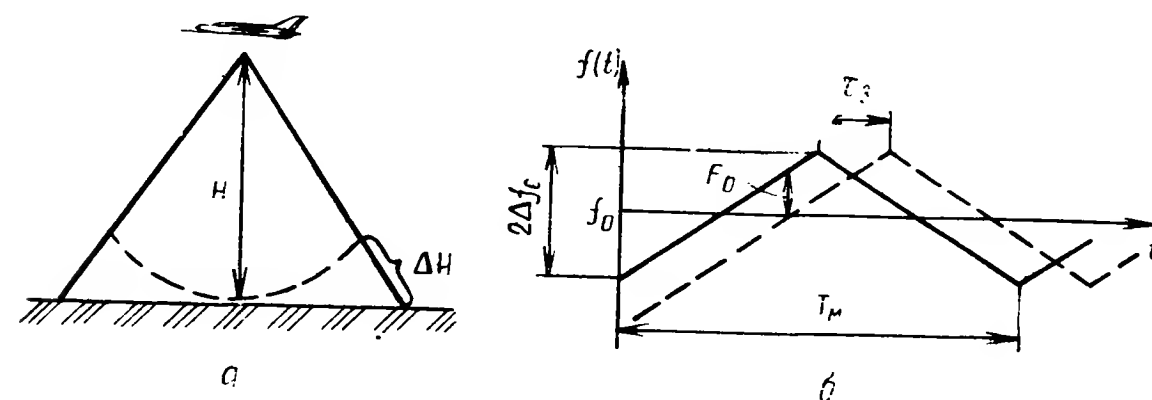


Рис. 7.7. К пояснению принципа действия радиовысотомера малых высот: геометрические соотношения (а); временные графики зависимости частот сигналов (б)

(сплошная линия). Сигнал, отраженный от земли, будет иметь тот же закон изменения частоты $f(t)$, что и зондирующий, но смещенный по шкале времени на $\tau_3 = 2H/c$. В приемнике РВ малых высот зондирующий и принятый сигналы сравниваются по частоте с выделением разностной частоты

$$F_6 = 4\Delta f_c \tau_3 / T_m = 8H\Delta f_c / cT_m = k_H H. \quad (7.5)$$

Из выражения (7.5) следует, что измерение высоты сводится к измерению частоты биений с помощью частотомера.

Ошибки измерения высоты полета с помощью РВ малых высот составляют 1—2 м, поэтому они пригодны для контроля положения самолета в процессе выполнения посадки.

Дальномерные системы, требующие для определения места самолета использования двух маяков-ответчиков, практически полностью вытеснены угломерно-дальномерными, решающими ту же задачу при использовании только одного маяка-ответчика. Один маяк обслуживает одновременно несколько самолетов.

Сигналы самолетного запросчика принимаются наземным маяком-ответчиком и на другой длине волны переизлучаются через ненаправленную антенну (рис. 7.6). Излучение ненаправленной антенны позволяет на самолете измерить дальность до маяка, а также зафиксировать момент прохождения оси направленной антенной направления на север. Сигналы направленной антенны (непрерывные или импульсные) служат для измерения азимута самолета.

7.2.3. Разностно-дальномерные системы

Для обеспечения большой дальности действия разностно-дальномерные РНС работают на длинных волнах ($\lambda = 3 \cdot 10^3 \div 10^4$ м). Эти волны за счет дифракции огибают Землю, так что их можно принимать на дальностях в несколько тысяч километров. Но, поскольку маяки работают импульсами, длительность последних не может быть малой. Практически в радиопульсе для воспроизведения его огибающей требуется «вложить» не менее 10 периодов несущего колебания f_0 . Это означает, что $\tau_{\text{и}} \geq 10\lambda/c$. При $\lambda = 3 \cdot 10^3$ м $\tau_{\text{и}} \geq 100$ мкс. В связи с этим при определении местоположения самолета по запаздыванию огибающей принятых радиоимпульсов ошибки измерения $\tau_{\text{в}}$ и $\tau_{\text{б}}$ (рис. 7.1, в) имеют величину близкую к T_0 , а местоположение ЛА определяется с ошибкой в несколько километров. В связи с этим в последние годы используются почти исключительно импульсно-фазовые разностно-дальномерные РНС. Так как в приемнике системы осуществляется измерение относительного запаздывания сигналов станции А — $u_A(t)$ и Б — $u_B(t)$, их можно записать в виде

$$u_A(t) = U_0(t) \cos \omega_0 t, 0 < t \leq \tau_{\text{и}}; \quad (7.6)$$

$$u_B(t) = U_0(t - \tau_3) \cos [\omega_0(t - \tau_3)] \text{ при } \tau_3 < t < \tau_{\text{и}} + \tau_3, \quad (7.7)$$

где τ_3 — относительное запаздывание сигналов.

Из выражений (7.6) и (7.7) следует, что информация о τ_3 может быть получена двояким образом: за счет измерения фазового сдвига $\varphi_0 = \omega_0 \tau_3$ и за счет сравнения огибающих $U(t)$ и $U(t - \tau_3)$. Однако точное измерение по разности фаз оказывается неоднозначным, так как функция $\varphi_0(\tau_3)$ — периодическая ($\varphi_0 =$

$= \delta\varphi \pm 2\pi k$, где $k = 0, 1, 2, \dots$ и $\delta\varphi$ — измеряемая часть разности фаз. Поэтому в рассматриваемых РНС измерение ведется в два этапа: сначала грубо — по огибающей с ошибкой, не превышающей T_0 , а затем точно — с помощью фазометра измеряется $\delta\varphi$. При этом уточняются результаты, полученные при грубом измерении. Инструментальные ошибки из-за этого уменьшаются примерно на два порядка. В связи с этим ошибки импульсно-фазовых систем по определению местоположения ЛА составляют сотни метров во всей рабочей зоне маяков системы.

В последние годы для целей навигации, в том числе и самолетной, все более широко используют ИСЗ. Так как траектории последних обладают высокой стабильностью, после точного определения параметров орбиты положение ИСЗ может быть предсказано с ошибкой в несколько метров в любой момент времени. При наличии трех (и более) спутников можно создать любую из рассмотренных космических систем радионавигации.

Наибольшей точностью будет обладать система, у которой на ИСЗ установлены маяки-ответчики. Принимая ответные сигналы и измеряя время запаздывания и доплеровский сдвиг частот ретранслированных сигналов с учетом точно прогнозируемого положения спутников, можно с высокой точностью определить положение запросчика (ЛА). Эту же задачу можно решить и методами, используемыми в разностно-дальномерных системах.

7.2.4. Доплеровские измерители скорости

Информация о путевой скорости ЛА используется для счисления пройденного им пути, выдерживания заданного режима полета, определения угла между векторами воздушной и путевой скорости и т. д. Поэтому ЛА имеют на борту доплеровский измеритель путевой скорости $|\vec{V}_{\text{п}}|$ и угла сноса α (ДИСС). В основе построения ДИСС лежит использование эффекта Доплера. На борту ЛА устанавливается приемопередатчик, снабженный антенной с остронаправленной диаграммой (рис. 7.8).

Сигнал, отраженный от земли, сравнивается по частоте с зондирующим. В результате выделяется разностная частота — частота Доплера

$$F_{\text{д}} = \frac{2V_{\text{п}}}{\lambda} \cos \eta. \quad (7.8)$$

Угол установки оси антенны относительно продольной оси самолета η известен или может быть измерен, если антенна подвижна. Таким образом, модуль вектора путевой скорости $V_{\text{п}}$ может быть измерен однолучевой ДИСС. Но самолет находится в подвижной среде, поэтому он перемещается в боковом направлении под воздействием ветра, имеющего скорость W . Для того чтобы лететь к пункту назначения по прямой, самолет вынужден по-

вернуть свою продольную ось на угол сноса α в направлении, компенсирующем снос.

В ДИСС определение α может достигаться установкой антенн, имеющих, по крайней мере, два луча, симметричных относительно продольной оси самолета. При наличии сноса ($\alpha \neq 0$) допле-

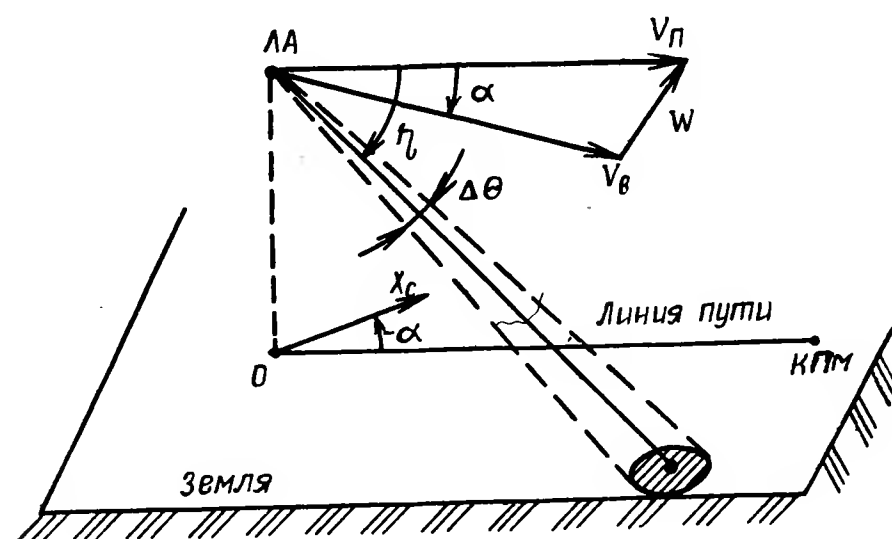


Рис. 7.8. Геометрические соотношения, характеризующие работу ДИСС

ровские частоты, определенные по сигналам этих лучей, будут в общем случае разные. Разность частот несет информацию об угле сноса. Если антенна подвижна относительно продольной оси ЛА, выработав сигнал, пропорциональный $\Delta F_d = F_{d1} + F_{d2}$, и повернув антенну до $\Delta F_d = 0$, можно определить α как угол поворота оси симметрии лучей относительно оси x_c . Современные ДИСС имеют неподвижные антенны, а угол α вычисляется на основе измеренных значений доплеровских частот.

Недостатком ДИСС является неустойчивая работа при полетах над морем. При отсутствии волнения на море сигнал отражается зеркально и на вход приемника не поступает.

Глава 8. РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ СРЕДСТВА СВЯЗИ И УПРАВЛЕНИЯ

8.1. Классификация РЭС связи и управления

Для передачи и приема (обмена) информации (команд, сообщений) в системах управления войсками и боевыми средствами применяются различные способы и технические средства связи, в том числе и средства радиосвязи. Радиосвязь осуществляется между двумя или несколькими пунктами путем излучения и приема радиоволн.

В зависимости от характера передаваемых сообщений и применяемых оконечных устройств (по виду связи) радиосвязь подразделяется на телефонную, телеграфную, факсимильную (фото-телеграфную), телевизионную и телекодую.

Телефонная радиосвязь предназначена для передачи и приема речевой информации. Для ведения связи на передающей стороне осуществляется преобразование речевых сообщений в электрические сигналы в микрофоне телефонного аппарата. Электрические сигналы используются для модуляции радиочастотных колебаний передатчика радиостанции. Промодулированные речевым сообщением колебания передатчика излучаются антенной в направлении пункта приема. На приемной стороне осуществляется обратное преобразование модулированных радиочастотных колебаний в речевое сообщение.

Телеграфная радиосвязь применяется для передачи и приема дискретных сообщений, состоящих из отдельных букв, цифр, символов, знаков. При этом виде связи каждой букве (цифре, символу, знаку) присваивается определенное сочетание элементарных сигналов — кодовая комбинация. Так, в соответствии с кодом Морзе каждая буква алфавита заменяется комбинацией точек, тире и пауз. Они, в свою очередь, преобразуются в стандартные электрические сигналы, отличающиеся, например, частотой, фазой, длительностью или полярностью. Электрические сигналы используются далее для манипуляции радиочастотных колебаний передатчика.

При факсимильной (фототелеграфной) радиосвязи осуществляется передача и прием неподвижных изображений (печатные, машинописные и рукописные тексты, чертежи, графики, фотографии). Принцип передачи изображений заключается в преобразовании информации о яркости малых элементов изображения в электрические сигналы с помощью фотоэлектронных преобразователей. Электрические сигналы используются затем для модуляции излучаемого сигнала. В приемном пункте производится обратное преобразование. Принимаемое изображение воспроизводится на фотоматериале с помощью светового пятна.

Системы телевизионной радиосвязи служат для передачи и приема подвижных изображений.

Телекодвая радиосвязь (передача данных) осуществляет передачу и прием дискретной формализованной информации, закодированной в двоичном или другом коде, предназначенной для ее обработки в ЭВМ. Применяется для передачи различных команд в системах управления войсками и оружием, в частности для передачи команд наведения истребителей и ракет на воздушные цели. Системы передачи этих команд называются командными радиопередачами управления (КРУ).

В зависимости от используемых технических средств и среды распространения сигналов радиосвязь принято делить на радиорелейную, тропосферную, ионосферную, метеорную и космическую.

В основе радиорелейной связи лежит многократная ретрансляция сигналов, передаваемых по радиолинии.

Тропосферная радиосвязь обычно ведется в сантиметровом диапазоне волн. За счет рассеянного отражения радиоволн в тропосфере достигается увеличение дальности связи за пределы дальности прямой видимости.

Ионосферная радиосвязь основана на отражении радиоволн от ионосферы или их рассеянии на ее неоднородностях.

Метеорная радиосвязь ведется в УКВ-диапазоне за счет отражения радиоволн от ионизированных следов метеоров.

Космическая радиосвязь — связь на УКВ с использованием ИСЗ как ретрансляторов передаваемых сигналов. При этом возможна активная или пассивная ретрансляция. Активная ретрансляция предусматривает установку на борту ИСЗ приемно-передающего ретранслятора. Для пассивной ретрансляции сигналов на орбиту выводятся ИСЗ с большой отражающей поверхностью.

Системы радиосвязи могут быть аналоговыми, импульсными (дискретными) или цифровыми.

В аналоговых системах радиосвязи передаваемые сообщения являются непрерывными функциями времени. В зависимости от вида модуляции различают системы радиосвязи с амплитудной, однополосной, частотной и фазовой модуляцией. Радиосигналы с амплитудной, частотной и фазовой модуляцией рассмотрены в гл. 1. При однополосной модуляции излучается только одна из боковых полос АМ-радиосигнала. Колебание несущей частоты и другая боковая полоса подавляются и исключаются из передачи, что приводит к сокращению вдвое полосы излучаемых частот и к увеличению в четыре раза мощности боковых составляющих. Помехоустойчивость аналоговых систем радиосвязи принято оценивать отношением сигнал/шум на их выходе.

В импульсных системах радиосвязи аналоговое сообщение передается последовательностью импульсов, один из параметров которых изменяется в соответствии со значениями отсчетов аналогового сообщения. В зависимости от изменяемого параметра импульсной последовательности различают импульсные системы радиосвязи с амплитудно-импульсной, широтно-импульсной и фазово-импульсной модуляцией (АИМ, ШИМ и ФИМ соответственно).

В цифровых системах радиосвязи передаваемые цифровые сообщения и радиосигналы имеют конечное число состояний. В зависимости от вида манипуляции несущего колебания различают системы с амплитудной, частотной, фазовой, относительно фазовой манипуляцией и тональными видами манипуляций. В системах радиосвязи с тональной манипуляцией сначала производится манипуляция одного из параметров поднесущего колебания, которое используется затем для модуляции несущего колебания. С помощью цифровых систем радиосвязи могут быть переданы ана-

логовые сообщения. Для этого они предварительно преобразовываются в цифровые путем дискретизации по времени, квантования по уровням и кодирования квантованных выборок цифровыми кодами. Для этих целей могут использоваться импульсно-кодовая модуляция и дельта-модуляция. При передаче цифровых сообщений широко используются двоичные сигналы «0» и «1».

В зависимости от значения базы радиосигнала системы радиосвязи делят на широкополосные и узкополосные. База радиосигнала определяется отношением ширины спектра модулированного радиосигнала к ширине спектра модулирующего сигнала $B = \Delta f_{\text{pc}} / \Delta F_{\text{с}}$. Система радиосвязи называется широкополосной, если в ней используются радиосигналы с $B > 1$, и узкополосной — при $B \approx 1$.

По количеству одновременно передаваемых сообщений системы радиосвязи делятся на одноканальные и многоканальные. По методам разделения (уплотнения) сообщений многоканальные системы радиосвязи подразделяют на системы с частотным, временным и фазовым методами разделения каналов.

Радиосвязь бывает односторонней и двусторонней. При односторонней радиосвязи одна из радиостанций осуществляет только передачу, а другая (другие) только прием. В системе двусторонней радиосвязи передача и прием ведутся в обоих направлениях. При двусторонней радиосвязи возможна симплексная или дуплексная связь. Симплексная связь — это связь, при которой передача и прием на каждой радиостанции осуществляются поочередно. При дуплексной связи передача и прием осуществляются одновременно. Дуплексная радиосвязь ведется на двух различных несущих (рабочих) частотах.

По способам защиты передаваемой информации системы радиосвязи делятся на открытые и закрытые (засекреченные). В закрытых системах сам факт передачи не скрывается. Однако передаваемые сообщения путем специального кодирования (шифрования) преобразуются в сигналы, декодирование (расшифровка) которых для противника является довольно трудной задачей.

Радиосвязь ведется в широком диапазоне длин волн — от микроволновых (сверхдлинноволновая радиосвязь) до метровых — децимиллиметровых (УКВ-радиосвязь).

8.2. Требования, предъявляемые к системам радиосвязи

К системам радиосвязи предъявляются следующие основные требования: оперативность (своевременность), надежность, достоверность, помехоустойчивость, скрытность и пропускная способность.

Оперативность — способность системы радиосвязи обеспечить прием и доставку сообщений или ведение переговоров в сроки, обусловленные потребностями управления.

Надежность — способность системы радиосвязи обеспечить непрерывное управление силами и средствами в любых условиях обстановки в течение заданного промежутка времени. Надежность зависит от технического состояния аппаратуры, состояния среды распространения радиоволн и электромагнитной обстановки. При воздействии помех радиосвязь может быть нарушена даже при полной аппаратурной надежности РЭС связи и управления (система радиосвязи подавлена помехами).

Достоверность характеризует степень точности воспроизведения информации в пункте приема. Критерии оценки достоверности определяются характером и важностью передаваемых сообщений. Достоверность передачи речевых сообщений оценивается показателем артикуляции (разборчивости), определяемым отношением количества правильно принятых элементов речи (фраз, слогов, звуков) к общему числу переданных. Достоверность передачи цифровых сообщений оценивается вероятностью ошибочного приема кодовых комбинаций, символов и т. д. Допустимая вероятность ошибочного приема символа в автоматизированных системах управления равна $10^{-4} \div 10^{-10}$.

Помехоустойчивость радиосвязи характеризует способность системы радиосвязи функционировать с заданной эффективностью при воздействии помех. Помехоустойчивость определяется видом используемых радиосигналов, способом кодирования, методом приема, отношением сигнал/помеха на входе радиоприемника. Для количественной оценки помехоустойчивости используются показатели достоверности передачи информации. Например, помехоустойчивость аналоговых систем радиосвязи может оцениваться средним квадратом ошибки передачи сообщений, а цифровых систем — вероятностью ошибочного приема символа. Графики зависимости помехоустойчивости от вида манипуляции приведены на рис. 8.1. Из графиков видно, что наиболее высокой помехоустойчивостью

обладают системы радиосвязи с ФМ. При $W_{\text{ом}} = 1 \cdot 10^{-3}$ эти системы обеспечивают выигрыш по мощности, равный двум, по сравнению с системами с ЧМ и четырем — по сравнению с системами с АМ.

Скрытность радиосвязи — способность системы радиосвязи исключить или предельно затруднить раскрытие противником содержания передаваемой информации и мест расположения пунктов управления. Скрытность радиосвязи можно повысить путем использования передатчиков с минимальной мощностью и направленностью антенн, сокращением времени передачи, выполнением мероприятий по радиомаскировке, соблюдением правил радиообмена, применением специальной аппаратуры и документов связи.

Пропускная способность системы радиосвязи определяется максимальным количеством информации, передаваемой по каналу радиосвязи в единицу времени. Пропускная способность канала радиосвязи определяется выражением

$$C = \Delta f_{\text{рс}} \log \left(1 + \frac{P_c}{P_{\text{п}}} \right), \quad (8.1)$$

где $\Delta f_{\text{рс}}$ — ширина спектра полезного сигнала; P_c , $P_{\text{п}}$ — мощности полезного и помехового сигналов.

Выражение (8.1) справедливо в том случае, когда радиоканал — идеальный фильтр, а помеховый сигнал — гауссовский белый шум.

8.3. Способы организации радиосвязи

Основными способами осуществления радиосвязи являются связь по радионаправлению и связь по радиосети.

Связь по радионаправлению организуется между двумя корреспондентами на наиболее важных направлениях. В зависимости от возможностей РЭС и числа выделенных рабочих частот связь по радионаправлению может быть симплексной, дуплексной и полудуплексной. Как известно, при симплексной радиосвязи (рис. 8.2, а) радиостанции попеременно работают на передачу и прием. При этом способе связи отсутствует возможность переспроса корреспондента, работающего на передачу. При дуплексной радиосвязи (рис. 8.2, б) обеспечивается возможность ведения радиосвязи одновременно в двух направлениях. Достоинствами связи по радионаправлению являются быстрота вхождения в связь, высокая пропускная способность, возможность маскировки связи (работа на разных частотах, вхождение в связь без позывных и др.). К ее недостаткам следует отнести необходимость обеспечения большого количества РЭС и рабочих частот связи.

Связь по радиосети (рис. 8.2, в) организуется между несколькими корреспондентами. Все радиостанции работают на одной частоте. Радиостанция одного из корреспондентов (старшего командира) — ведущая. Достоинствами связи по радиосети являются

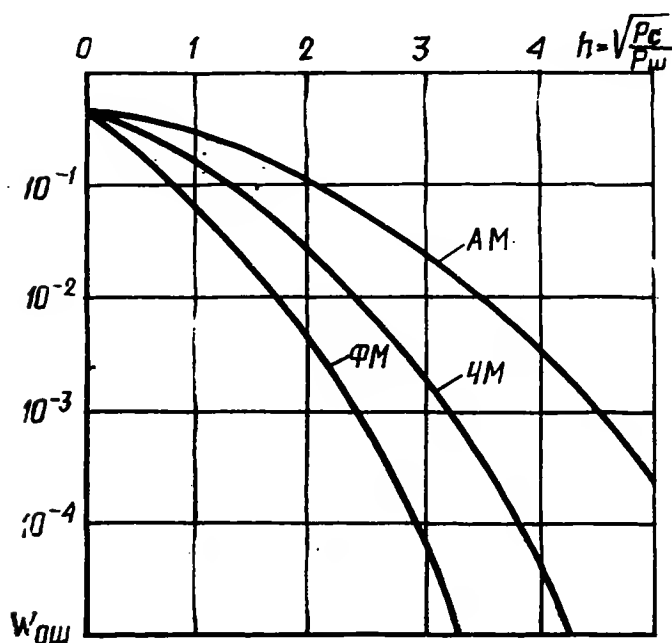


Рис. 8.1. Графики зависимости помехоустойчивости от вида модуляции

меньшее потребное количество средств радиосвязи и рабочих частот связи по сравнению с работой по радионаправлению и возможность одновременной (циркулярной) передачи ведущей станцией одного сообщения всем корреспондентам. Недостатками связи по радиосети являются низкая пропускная способность при ра-

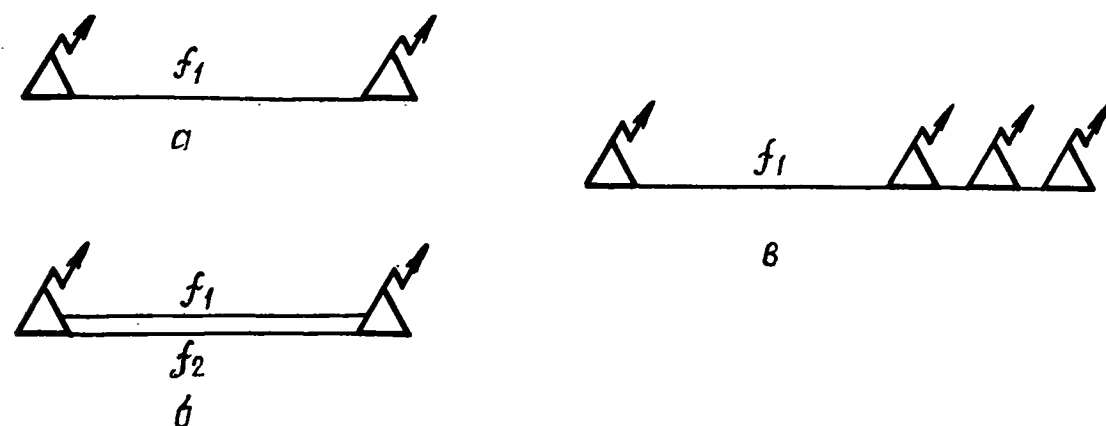


Рис. 8.2. Способы осуществления радиосвязи: симплексная радиосвязь (а); дуплексная радиосвязь (б); связь по радиосети (в)

диообмене и трудность радиомаскировки. На практике находят применение комбинированные сети радиосвязи (по радиосетям и по радионаправлениям).

8.4. Авиационные радиостанции

Авиационные радиостанции предназначены для передачи телефонных и телеграфных сообщений (команд) по линиям связи «самолет — самолет» («воздух — воздух»), «самолет — командный пункт» («воздух — земля») и «командный пункт — самолет» («земля — воздух»). По месту установки рассматриваемые радиостанции делятся на бортовые (самолетные и вертолетные) и наземные (аэродромные). Бортовые радиостанции по тактическому назначению, в свою очередь, подразделяются на командные, связные и аварийные.

Командные радиостанции предназначены для обеспечения экипажей самолетов телефонной и телеграфной связью с командными пунктами (КП) и другими самолетами в пределах прямой видимости. Указанные радиостанции устанавливаются на всех самолетах и вертолетах. Работают они в диапазоне частот 100—150 и 220—400 МГц. Поэтому их часто называют УКВ-радиостанциями. Выходная мощность передатчика радиостанций — 10—30 Вт, чувствительность приемника — порядка нескольких микровольт. Дальность радиосвязи зависит от высоты полета летательных аппаратов.

В данных радиостанциях обеспечивается беспойсковое и бесподстроечное вхождение в связь. Реализуется это предварительной настройкой радиостанции на несколько (10—20) заданных ра-

бочих частот (волн) связи. Выбор любой из этих частот в полете производится с пульта управления радиостанции. Время перестройки с одной рабочей частоты на другую не превышает 3 с.

При ведении телефонной радиосвязи применяется амплитудная и частотная модуляция, а при телеграфной радиосвязи — частотная манипуляция. Для передачи с КП на борт самолета различных команд, а также другой информации используется телекодвая связь. В этом случае радиостанции сопрягаются с быстродействующей аппаратурой телекодвой связи.

Структурная схема командной радиостанции изображена на рис. 8.3. Она состоит из приемника (ПРМ), передатчика (ПРД),

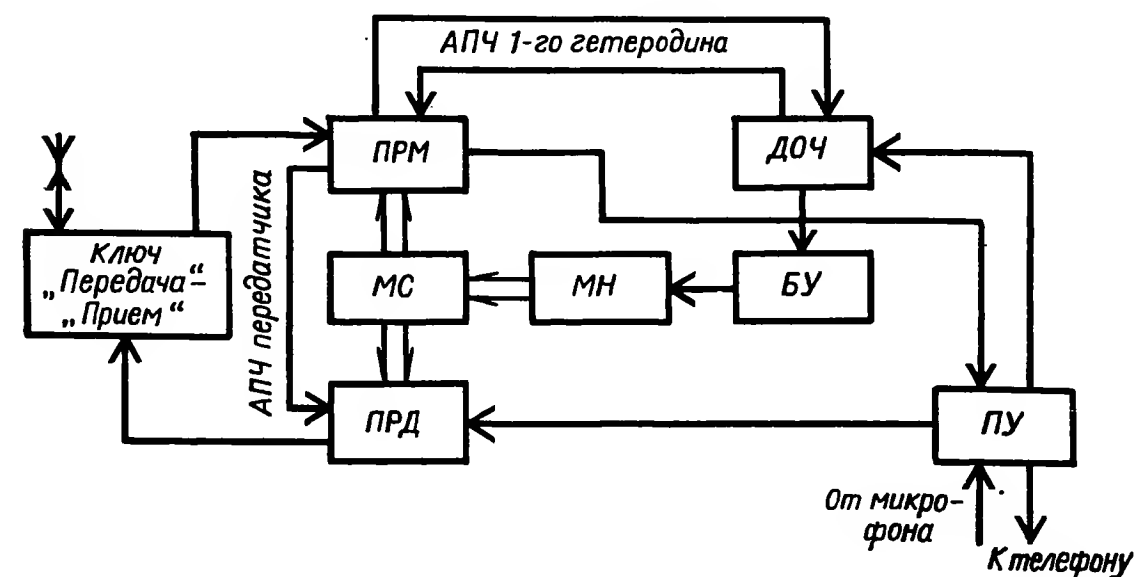


Рис. 8.3. Структурная схема командной радиостанции

датчика опорных частот (ДОЧ), механизмов настройки (МН) и сопряжения (МС), блока управления (БУ) и пульта управления (ПУ).

Приемник радиостанции — супергетеродинного типа с двойным или тройным преобразованием частоты. Кроме того, в приемнике имеются элементы схемы подстройки гетеродина по опорной частоте (ДОЧ) и элементы схемы подстройки частоты передатчика. Для исключения перегрузки приемника в нем используется устройство автоматической регулировки усиления (АРУ). В приемнике имеется также подавитель шумов, который отключает выход приемника при отсутствии полезного сигнала на его входе.

Передатчик выполняется по схеме, изображенной на рис. 2.2. Частота задающего генератора автоматически подстраивается под номинальное значение по частоте гетеродина с помощью автоматической подстройки частоты (АПЧ). Механизм настройки через блок сопряжения устанавливает оси конденсаторов настройки ПРМ и ПРД в требуемое положение (производит грубую настройку радиостанции на заданную рабочую частоту).

ДОЧ создает сетку опорных (кварцованных) частот, по которым производится точная настройка радиостанции. Установка нужной опорной частоты производится оператором с пульта управления. После установки переключателя выбора рабочей частоты в нужное положение автомата блока ДОЧ выбирает соответствующую опорную частоту. Механизм настройки затем производит грубую настройку передатчика и приемника. Далее производится поиск опорной частоты ДОЧ и настройка по ней 1-го гетеродина приемника. Одновременно с настройкой 1-го гетеродина производится настройка задающего генератора передатчика.

Передаваемое речевое сообщение, предварительно ограниченное по спектру до 300—3400 Гц, воздействует на усилитель мощности ПРД при АМ. Полученный АМ радиосигнал излучается антенной радиостанции. В режиме «Прием» сигналы, принимаемые антенной радиостанции, усиливаются и прослушиваются оператором.

Связные самолетные радиостанции предназначены для телефонной и телеграфной радиосвязи на дальностях более 300 км. Работают в диапазоне частот 2—30 МГц. Эти радиостанции называют коротковолновыми (КВ). Они устанавливаются, как правило, на самолетах бомбардировочной и военно-транспортной авиации и используются для дальней радиосвязи. Дальность связи составляет несколько тысяч километров и не зависит от высоты полета самолетов. Выходная мощность передатчиков связных радиостанций составляет десятки и сотни ватт, чувствительность приемников — 1—2 мкВ в телеграфном и телефонном режимах при ОМ и 4—5 мкВ — в телефонном режиме при АМ.

В КВ-радиостанциях создается дискретная сетка рабочих частот с шагом сетки в 100 или 1000 Гц. Радиостанция может быть предварительно настроена на 20 частот связи. Время перестройки с одной частоты на другую не превышает 30 с.

Для увеличения дальности телефонной радиосвязи используется режим ОМ. Мощность передатчика в этом режиме почти полностью расходуется на излучение боковых составляющих, в которых содержится передаваемая информация. ОМ по сравнению с АМ позволяет увеличить дальность телефонной радиосвязи, повысить количество рабочих частот и помехоустойчивость связи.

Структурная схема связной радиостанции аналогична структурной схеме командной радиостанции.

Аварийные радиостанции используются членами экипажа для подачи сигналов бедствия с места вынужденного приземления. Эти радиостанции работают в диапазоне УКВ, КВ или СВ на одной или нескольких фиксированных частотах.

8.5. Многоканальные системы радиосвязи

При организации наземной радиосвязи между штабами частей и соединений, при передаче развединформации с самолета на землю, а также при наведении с земли истребителей на воздушные цели возникает необходимость в одновременной передаче многих

сообщений. В этих случаях используются многоканальные системы радиосвязи, позволяющие по одной радиолинии связи передавать одновременно несколько различных сообщений.

Упрощенная структурная схема многоканальной системы радиосвязи представлена на рис. 8.4. Информация от нескольких источников в виде преобразованных электрических сигналов посту-

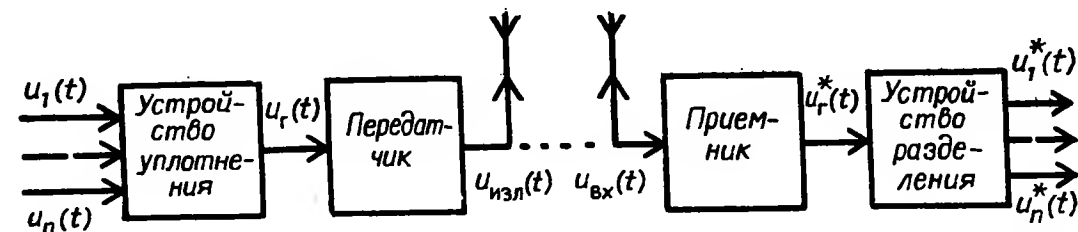


Рис. 8.4. Структурная схема многоканальной системы радиосвязи

пает на устройство уплотнения, с выхода которого суммарный (групповой) сигнал поступает на передатчик и модулирует несущее колебание. Модулированный радиосигнал излучается передающей антенной. На приемной стороне принятый радиосигнал усиливается и детектируется в приемнике. Полученный на выходе приемника групповой сигнал поступает в устройство разделения, на выходе которого формируются переданные сообщения. Для уплотнения сообщений на передающей стороне и разделения на приемной широко используются частотные и временные методы.

В системах с частотным разделением (рис. 8.5) для каждого канала выделяется определенная поднесущая частота, смещенная

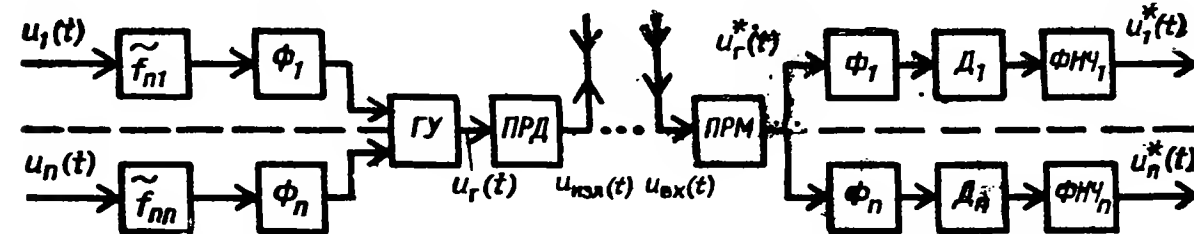


Рис. 8.5. Структурная схема многоканальной системы радиосвязи с частотным разделением сигналов

относительно других поднесущих частот. Колебания каждой поднесущей частоты модулируются сообщением, передаваемым по данному каналу. Разнос поднесущих частот выбирается так, чтобы после модуляции их спектры не перекрывались. Колебания всех каналов суммируются в групповом усилителе (ГУ), модулируют колебания несущей частоты и передаются по общей радиолинии. На приемной стороне после усиления и детектирования происходит разделение принятых сигналов по соответствующим каналам с помощью набора полосовых фильтров. Помимо телефонных сообщений в многоканальных системах могут передаваться также телеграфные и другие виды сообщений.

При временном разделении каналов осуществляется поочередная передача информации по каждому каналу в виде импульсов, модулированных передаваемым сообщением (по амплитуде, ширине, временному положению). На приемной стороне импульсы, соответствующие различным каналам, разделяются по отдельным цепям в той же временной последовательности, что и при передаче, затем в каждой цепи осуществляется восстановление сообщения, передаваемого по данному каналу. Устройство уплотнения каналов представляет собой коммутатор, поочередно подключающий каналы в системе радиосвязи (рис. 8.6). Коммутатор управляется

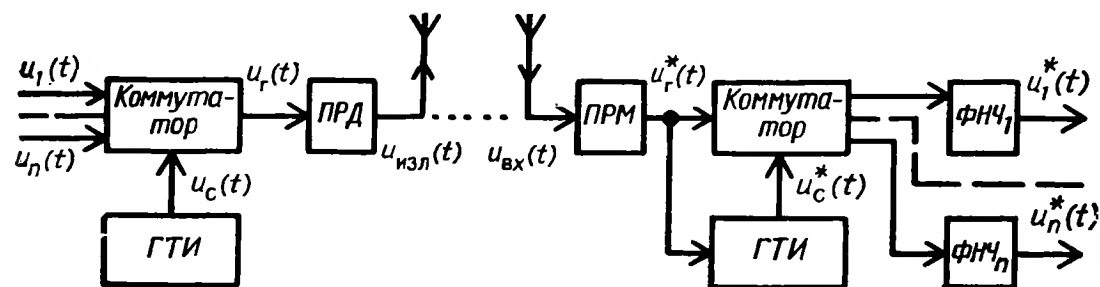


Рис. 8.6. Структурная схема многоканальной системы радиосвязи с временным разделением сигналов

генератором тактовых импульсов (ГТИ). Паузы между соседними импульсами одного канала используются для передачи импульсов другого канала или нескольких каналов.

Принцип временного уплотнения поясняется графиками, приведенными на рис. 8.7, на примере передачи двух сообщений. На приемной стороне сигналы с выхода приемника поступают на коммутатор приемной станции. Для нормальной работы системы свя-

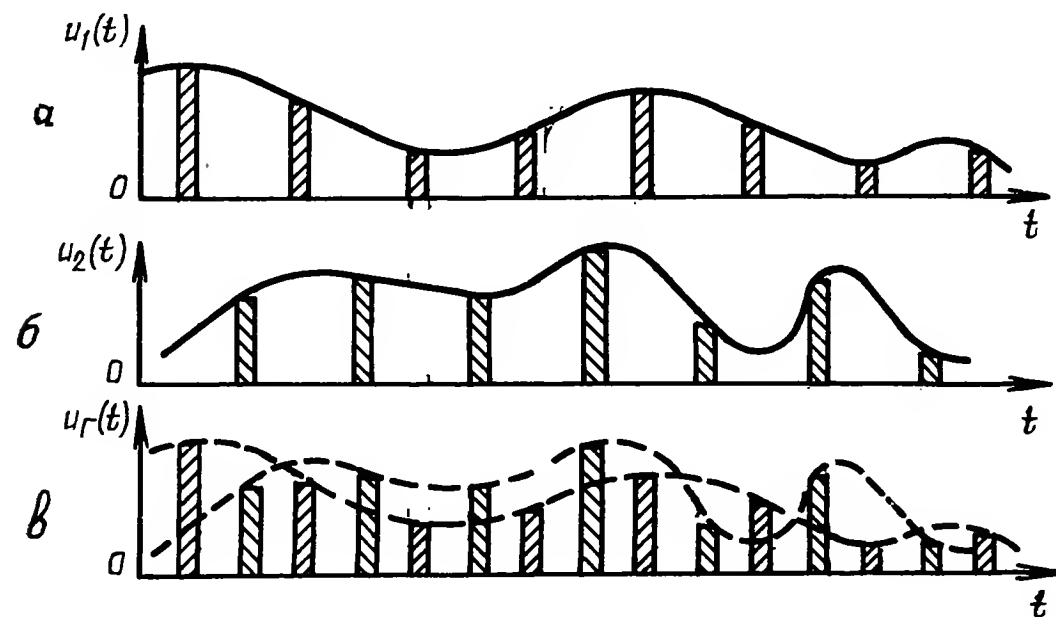


Рис. 8.7. Принцип временного уплотнения сигналов: а — сообщение $U_1(t)$; б — сообщение $U_2(t)$; в — групповой сигнал

зи необходима передача синхронизирующих импульсов. Сигналы каналов, представляющие собой выборки сообщения, подаются на фильтры низших частот для восстановления переданных сообщений. При временном уплотнении первичное преобразование сообщений в импульсный сигнал может осуществляться методами широтно-импульсной (ШИМ) или фазово-импульсной (ФИМ) модуляции, а в цифровой сигнал — методами импульсно-кодовой модуляции (ИКМ) и дельта-модуляции (ДМ).

8.6. Командные радиолинии управления

Командные радиолинии управления (КРУ) предназначены для передачи команд наведения на управляемый объект (ракеты, самолет). Наиболее распространенными командами являются аналоговые низкочастотные сообщения, несущие информацию о курсе, скорости и высоте полета объекта. Эти сообщения преобразуются перед передачей в импульсный или цифровой сигнал методами АИМ, ШИМ, ФИМ, ИКМ и ДМ.

КРУ, как правило, являются многоканальными системами связи. В качестве устройства уплотнения и разделения каналов в КРУ используются шифратор и дешифратор. В шифраторе формируются непрерывные или импульсные поднесущие, которые модулируются передаваемыми командами. В КРУ применяются различные виды модуляции поднесущих, но наиболее широко ШИМ, ФИМ и ИКМ.

Возможность передачи аналоговых сообщений импульсными и цифровыми сигналами вытекает из теоремы Котельникова, в соответствии с которой сообщение с ограниченным спектром может быть передано рядом его выборочных значений (выборками) малой длительности. При этом период квантования T_k должен удовлетворять соотношению $T_k \leq 0,5/F_v$, где F_v — верхняя частота спектра передаваемого сообщения. Такое преобразование аналогового сообщения в импульсное называется АИМ. Следовательно, при АИМ передаваемое сообщение (рис. 8.8, а) представляет собой последовательность импульсных сигналов, амплитуды которых изменяются по закону передаваемого сообщения (рис. 8.8, б).

В КРУ с ШИМ передаваемое сообщение представляет собой последовательность импульсов постоянной амплитуды, длительность которых изменяется по закону передаваемого сообщения (рис. 8.8, в). Такое преобразование осуществляется с помощью модулятора. Восстановление исходного сообщения осуществляется подачей последовательности видеоимпульсов на фильтр низших частот.

В КРУ с ФИМ передаваемое сообщение кодируется разностью временных интервалов (фазой) между импульсами опорной и исполнительной групп (рис. 8.8, г). В качестве опорных импульсов используются импульсы синхронизатора. Исполнительные (рабочие) импульсы получаются в результате дифференцирования импульсов, полученных методом ШИМ. Для разделения опорных и

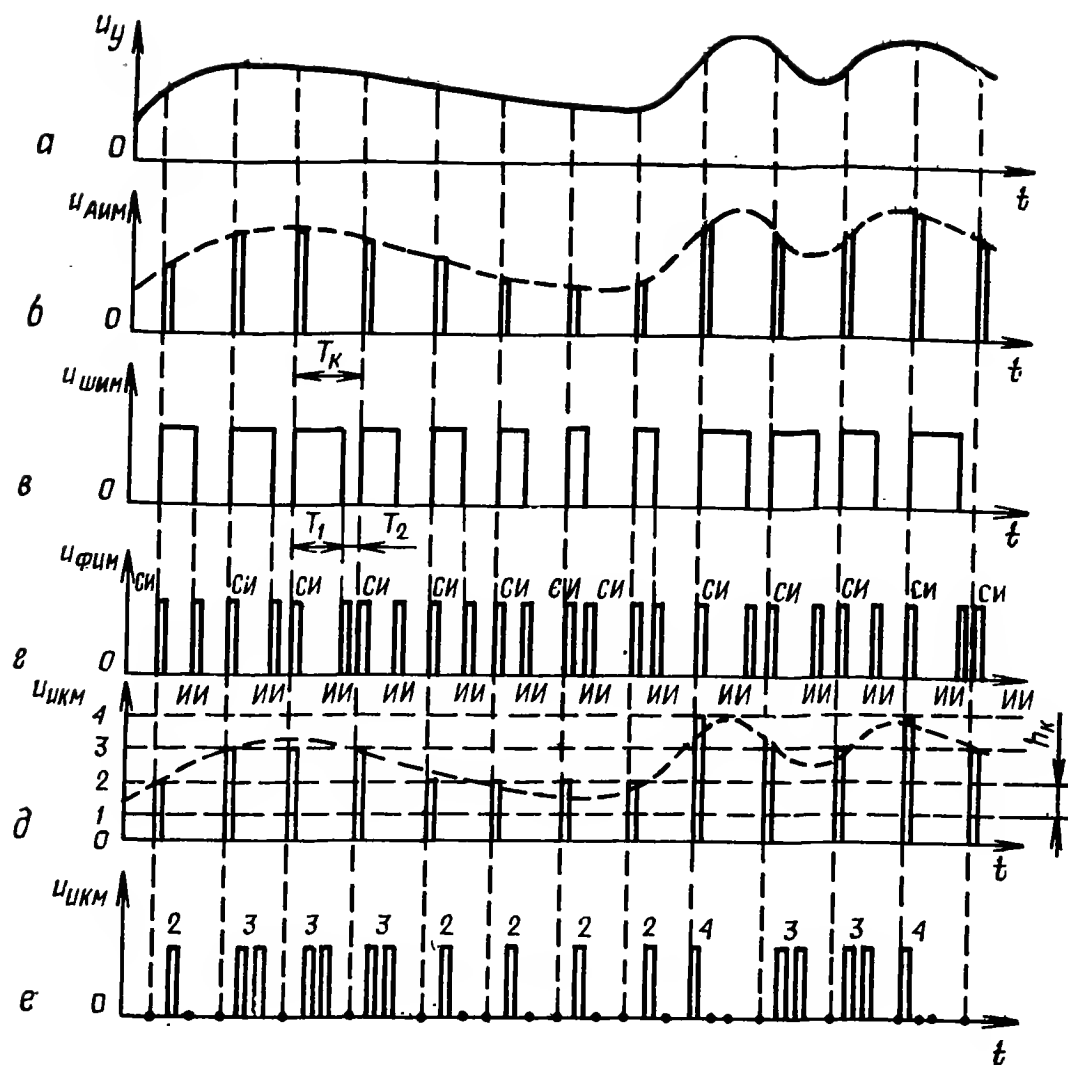


Рис. 8.8. Способы передачи аналоговых сообщений (а) методами АИМ (б), ШИМ (в), ФИМ (г), ИКМ (д, е)

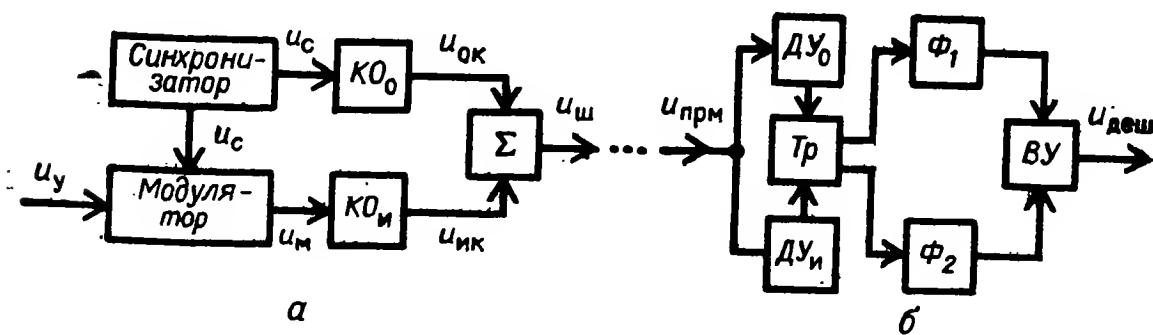


Рис. 8.9. Шифратор (а) и дешифратор (б) КРУ с ФИМ

исполнительных импульсов на приемной стороне осуществляется их дополнительное кодирование (количеством импульсов и временным интервалом между ними). Принцип действия КРУ с ФИМ поясняется структурной схемой и графиками, приведенными на рис. 8.9 и 8.10. Здесь КО_о и КО_и — кодообразователи импульсов опорной и исполнительной команд, ДУ_о и ДУ_и — их декодирую-

щие устройства, Т_р — триггер, ВУ — вычитающее устройство. Восстановление исходного сообщения осуществляется обычно преобразованием ФИМ импульсов в ШИМ, которые затем воздействуют на фильтр низших частот.

В КРУ с ИКМ передаваемое сообщение подвергается дискретизации по времени и квантованию полученных выборок по уровням (рис. 8.8, д). Квантованная по уровням выборка представляется обычно двоичным кодом, составленным из символов «1» и «0» (рис. 8.8, е).

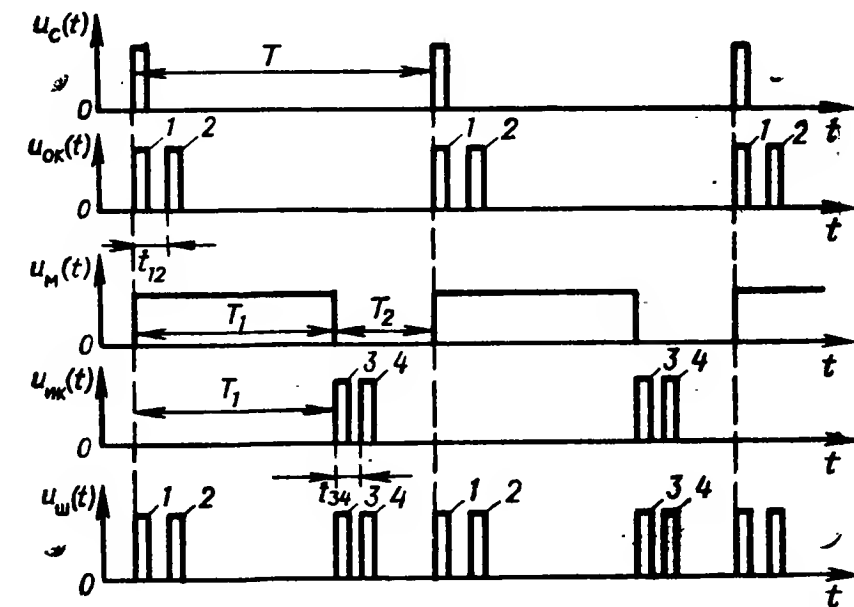


Рис. 8.10. Графики, поясняющие принцип действия КРУ с ФИМ

При ДМ квантованию подвергается не само сообщение, а разность между выборочным значением (выборкой) в момент времени t_i и оценкой в предыдущий момент времени t_{i-1} .

Из КРУ с импульсными сигналами наибольшей помехоустойчивостью обладает КРУ с ФИМ. КРУ с ИКМ достаточно просты, однако они уступают по помехоустойчивости КРУ с ДМ.

РАЗДЕЛ II

РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ СРЕДСТВА СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПВО И ВВС

Глава 9. АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

9.1. Организация системы ПВО

Военно-политическое руководство блока НАТО наряду с постоянным наращиванием ударной мощи своих вооруженных сил проводит мероприятия по дальнейшему повышению эффективности ПВО. Рассмотрим кратко организацию системы ПВО на примере объединенной системы ПВО НАТО в Европе. Указанная система состоит из четырех зон (рис. 9.1): Северной, Центральной, Южной и Атлантической.

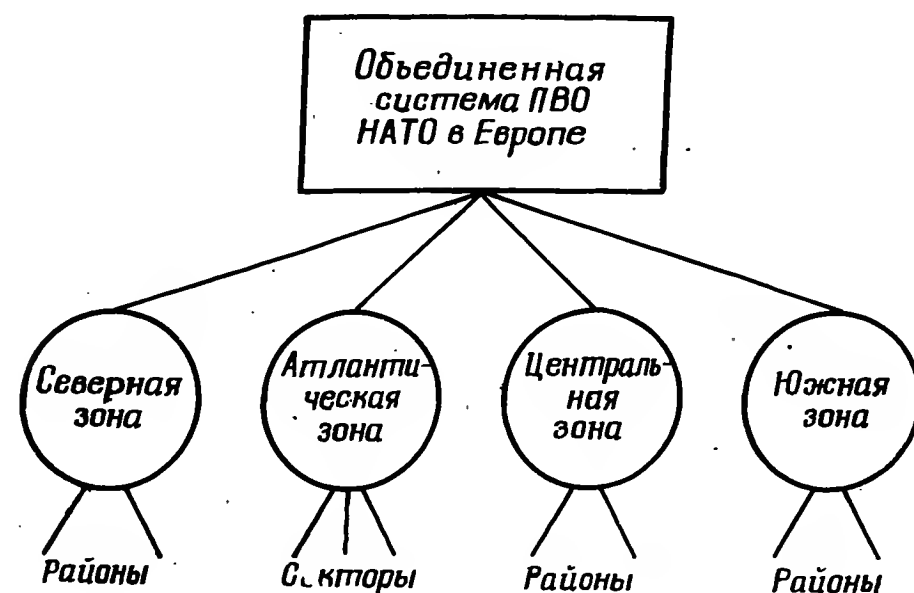


Рис. 9.1. Организационная структура объединенной системы ПВО НАТО в Европе

Система ПВО каждой зоны построена по однотипному принципу. Зоны состоят из районов. Районы делятся на секторы. Атлантическая зона включает только секторы. Границы районов совпадают с зонами ответственности объединенных или национальных тактических авиационных командований (ОТАК и ТАК).

Общее руководство всеми силами и средствами ПВО объединенной системы ПВО НАТО в Европе осуществляет верховный

главнокомандующий объединенными вооруженными силами (ВГК ОВС). В качестве активных средств системы ПВО используются истребительная авиация, группировки ЗРК и ЗСК, а также зенитные средства войсковых систем ПВО.

Основные тактико-технические данные (ТТД) ЗРК приведены в табл. 9.1.

Таблица 9.1

Основные ТТД ЗРК стран НАТО

Наименование (страна)	Масса ракеты, кг боевой части	Дальность стрельбы максимальная, км минимальная	Высота поражения цели максимальная, км минимальная	Максимальная скорость ракеты, м/с цели	Система управления
«Найк-Геркулес» (США)	4800 500	140 11	30 1,5	1150 775	Радиокомандная
«Бладхаунд» (Великобритания)	2360 160	120 9	20 0,05	1000 600	Полуактивная РГС
«Хок» (США)	625 73	42 2,5	20 0,01	900 600	Полуактивная РГС
«Пэтриот» (США)	853 •	100 3	30 0,06	1600 900	Радиокомандная I и II вида
«Индиго» (Италия)	120 •	10 1	5 0,015	850 •	Радиокомандная
«Спада» (Италия)	220 •	12 •	6 0,015	700 •	Полуактивная РГС
«Чапэрэл» (США)	84 5	4 0,5	3,0 0,15	850 550	ТГС
«Рапира» (Великобритания)	43,5 2,7	5 1,5	3,6 0,03	650 500	Радиокомандная
«Роланд»-2 (ФРГ)	62,5 6	6,2 0,26	5,5 0,015	580 450	Радиокомандная

Примечание. Здесь и далее точкой в графах таблиц обозначено отсутствие сведений.

ЗРК большой дальности «Найк-Геркулес» используются для уничтожения воздушных целей на высотах от 1500 до 30 000 м, а ЗРК «Бладхаунд» — 50—20 000 м.

ЗРК средней дальности «Хок» применяются для уничтожения воздушных целей на высотах от 10 до 20 000 м.

Таблица 9.2

Основные ТТД ЗСК стран НАТО

Наименование, калибр	Масса снаряда, кг	Эффективная дальность стрельбы, м	Максимальная досягаемость по высоте, м	Скорострельность одного ствола, выстр./мин
СЗСУ М42, 40 мм	0,89	1500	4650	120
Зенитная пушка (L 70), 40 мм	0,94	3000	4670	120
Зенитная пушка (L 60), 57 мм	2,6		7100	120
СЗСУ «Гепард», 35 мм	0,55	4000	5500	550
Счетверенная ЗПСУ, 12,7 мм	0,051	750	1500	550
Зенитная пушка «Вулкан», 20 мм	0,104	1200	2800	500

Таблица 9.3

Основные ТТД истребителей стран НАТО

Наименование (страна)	Экипаж, чел.	Максимальная скорость, км/ч	Практический потолок, м	Тактический радиус действия, км	Вооружение
F-104 G (США)	1	2300	18300	1000 3150	2—4 УР «Сайдвиндер», 20-мм пушка «Вулкан»
F-4 F, E (США)	2	2400	22000	1260 3700	4 УР «Спарроу» или 2 УР «Спарроу» и 4 УР «Сайдвиндер», 20-мм пушка «Вулкан»
«Лайтинг» F.6 (Великобритания)	1	2350	18300	800 2300	2 УР «Файрстрик» или 2 УР «Ред-Топ», 2×30-мм пушки
F-5E (США)	1	1480	15400	700 2230	2 УР «Сайдвиндер», 2×20-мм пушки
F-106 (США)	1	2300	18300	925 3700	2—6 УР «Сайдвиндер», 20-мм пушка

Наименование (страна)	Экипаж, чел.	Максимальная скорость, км/ч	Практический потолок, м	Тактический радиус действия, км	Вооружение
F-15A (США)	1	2650	21000	1000 4600	4 УР «Спарроу», 4 УР «Сайдвиндер», 25-мм пушка
F-16A (США)	1	2300	18300	925 3700	2—6 УР «Сайдвиндер», 20-мм пушка
«Торнадо»-F.2 (Великобритания, ФРГ, Италия)	2	2350	.	740 3200	2 УР «Сайдвиндер», 2—4 УР «Скайфлэш», 27-мм пушка

ЗРК малой дальности «Рапира» применяются для поражения низколетящих целей на высотах от 30 до 3600 м, а ЗРК «Чапэрэл» — 150—3000 м.

Для поражения воздушных целей из боевых порядков сухопутных войск используются ЗРК «Чапэрэл», «Стингер», «Рапира», а также ЗСК «Вулкан», «Гепард» и др. Основные ТТД ЗСК приведены в табл. 9.2.

Истребительная авиация ПВО применяется в основном для поражения целей за пределами зон поражения ЗРК. В качестве истребителей-перехватчиков (ИП) в объединенной системе ПВО НАТО в Европе используются самолеты F-4, F-15, F-16, F-102A, F-104, F-5 (США), «Лайтинг» (Великобритания) и др. Основные ТТД указанных ИП приведены в табл. 9.3.

9.2. Система управления силами и средствами ПВО НАТО в Европе

Управление силами и средствами объединенной системы ПВО НАТО в Европе осуществляется с помощью АСУ «Нейдж» через оперативные центры зон (ОЦЗ), районов (ОЦР) и секторов (ОЦС). Эта система предусматривает перехват воздушных целей на высотах до 30 000 м и скоростях полета до 2 М.

Оперативные центры производят сбор и обработку данных о противнике, оценку воздушной обстановки и управление силами и средствами ПВО в пределах закрепленной за ними территории. Эти центры имеют только средства обработки, отображения и передачи информации о воздушной обстановке, команд целеуказания ЗРК и ЗСК, наведения ИП. Структурная схема системы управления ПВО в секторе изображена на рис. 9.2.

Оперативный центр сектора имеет в своем подчинении несколько центров управления и оповещения (ЦУО), которые осуществляют прием и обработку информации о воздушной обстановке, производят оценку степени опасности целей, выбор средств для их поражения, выработку команд целеуказания ЗРК «Найк-Геркулес» и управления ИА. В состав оборудования ЦУО кроме устройств отображения информации, КВ, УКВ и радиорелейных линий связи входят одна-две РЛС обнаружения с системами опознавания государственной принадлежности целей. ЦУО могут под-

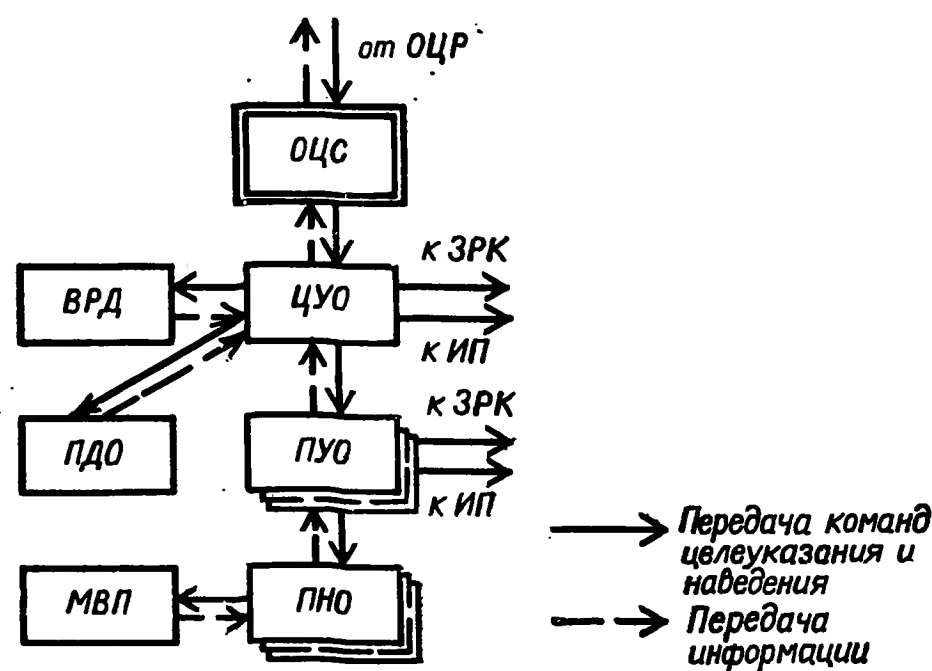


Рис. 9.2. Структурная схема АСУ ПВО НАТО в секторе

чиняться несколько пунктов управления и оповещения (ПУО), воздушных радиолокационных дозоров (ВРД) и постов дальнего обнаружения (ПДО). На этих пунктах и постах также устанавливаются РЛС обнаружения и опознавания целей, радиолокационные высотомеры, информация с которых с помощью линий радиосвязи поступает в ЦУО.

На ПУО осуществляются получение, сбор и обработка информации от маловысотных постов (МВП), постов наблюдения и оповещения (ПНО), вырабатываются команды целеуказания ЗРК и ЗСК и наведения истребителей. В состав штатного оборудования ПУО, ПНО, ПДО и МВП входят одна-две РЛС обнаружения и опознавания воздушных целей, несколько радиолокационных высотомеров, радиостанций КВ- и УКВ-диапазонов, радиоперехватных линий связи. Кроме того, на ПУО имеются ЦВМ и устройства отображения информации, которые позволяют решать задачи перехвата воздушных целей.

РЛС обнаружения целей центров и радиолокационных постов АСУ «Нейдж» создают сплошную зону радиолокационного наблюдения на больших и средних высотах.

К основным станциям АСУ «Нейдж» относятся трехкоординатные РЛС большой дальности AN/FPS-7, TRS-2201, HADR, TRS-2215D, GE-592, «Мартелло», TRS-2230D и RAT-315, двухкоординатные РЛС AN/FPS-8, S-247, а также РЛС определения высоты AN/FPS-89, HF-200 и др. Для усиления ПВО могут использоваться РЛС, входящие в состав систем управления воздушным движением (УВД) гражданской авиации (ASR-B1, ASR-5, ASR-8 и др.).

Имеющийся парк РЛС постоянно модернизируется и обновляется. Морально устаревшие РЛС заменяются новыми, в том числе с фазированными антенными решетками. Эти РЛС будут иметь более высокую помехозащищенность и пропускную способность.

Для обнаружения низколетящих целей в АСУ «Нейдж» используются также РЛС радиолокационных постов системы «Ларс».

Радиолокационные посты системы «Ларс» оснащены РЛС MPDR-30. В дальнейшем их планируется заменить на РЛС MPDR-45. Информация с РЛС системы «Ларс» передается на посты АСУ «Нейдж», а также используется для оповещения подразделений ЗРК и ЗСК. Кроме того, на вооружении АСУ «Нейдж» имеются системы дальнего радиолокационного обнаружения и управления АВАКС, установленные на самолетах Е-3А и «Нимрод-АЕ.3».

Управление силами и средствами ПВО строится по принципу строгой централизации с возможностью перехода в режим автономного управления, что достигается за счет использования ЦВМ и РЛС различных центров и постов. Для обработки информации о воздушной обстановке и решения задач целераспределения используются подсистемы «407-L», «412-L» и «Мисайл-Монитор». Каждый центр или пост управления и оповещения ПВО, оснащенный подсистемой «407-L» или «412-L», позволяет сопровождать до 400 воздушных целей и осуществлять одновременно наведение до 30 групп истребителей.

Подсистема «Мисайл-Монитор» позволяет одновременно сопровождать 264 и обстреливать 16 целей ракетами «Найк-Геркулес» или 32 цели ракетами «Хок».

Решение задачи уничтожения воздушных целей в ЦУО (ПУО) АСУ «Нейдж» производится следующим образом (рис. 9.3).

Данные о воздушной обстановке, полученные собственной РЛС и РЛС подчиненных постов, поступают в ЦВМ сопровождения целей. После ввода данных в ЦВМ сопровождения осуществляется их пересчет в единую систему координат ЦУО (ПУО). Далее ЦВМ начинает сопровождать каждую цель по трем координатам и тем самым прокладывать ее траекторию. Одновременно для каждой цели вырабатываются данные о курсе, высоте, скорости полета, которые поступают во внешнее запоминающее устройство (ЗУ).

В дальнейшем боевой расчет производит оценку воздушной обстановки и выявляет степень опасности целей. По требованию руководителя центра с помощью управляющей ЦВМ из внешнего ЗУ на пульт отображения обстановки поступают сведения о целях,

представляющих наибольшую угрозу. Для этих целей по указанию руководителя центра с помощью ЦВМ выбора оружия решается задача целераспределения. Результаты решения задачи целераспределения отображаются на пульте в виде точки (рубежа) перехвата, где цель может быть уничтожена с указанием вида оружия (ЗРК, ЗСК, ИП). Окончательное решение на уничтожение цели конкретным видом оружия принимает руководитель центра. После этого управляющая ЦВМ по его команде дает целеуказание группам ЗРК и ЗСК или команду на взлет истребителей. В последнем случае вступает в работу ЦВМ наведения, которая согласно принятому методу вырабатывает команды наведения, которые передаются на борт ИП с помощью КРУ. Число одновременно наводимых групп ИП зависит от возможностей ЦВМ наведения и числа каналов КРУ. Современные КРУ обеспечивают одновременно до 30 наведений.

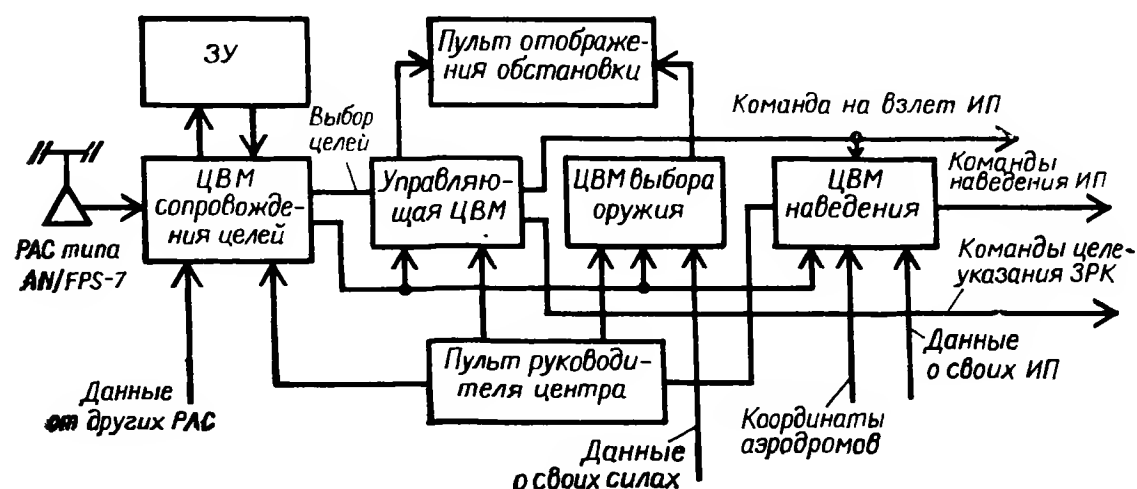


Рис. 9.3. Состав оборудования ЦУО (ПУО) АСУ «Нейдж»

Если принято решение уничтожить цель с помощью ЗРК или ЗСК, управляющая ЦВМ вырабатывает команды целеуказания группировкам ЗРК или ЗСК. При этом по сети оповещения ПВО передаются данные о цели (координаты, скорость и др.) и намечается точка обстрела. В случае необходимости руководитель центра может в любой момент изменить вид оружия, перенацелить ИП и ЗРК на другие цели.

Взаимодействие между подразделениями ЗРК, ЗСК и истребителями решается путем передачи данных о своих самолетах в центры управления или командные пункты групп ЗРК или ЗСК, либо определения зон ответственности активным средствам. Последний метод обеспечения взаимодействия используется в Центральной зоне. ЦУО (ПУО) работают в тесном контакте с соседними центрами и постами. Это позволяет расширить контролируемую зону, повысить живучесть системы ПВО.

Обмен информацией в АСУ «Нейдж» намечается осуществить на основе использования специальных помехозащищенных линий

передачи типа «Линк-16», используемых в тактической системе распределения информации и связи ДЖИТИДС и специальных устройств сопряжения.

Военное руководство блока НАТО проводит мероприятия по повышению эффективности систем управления ПВО «Нейдж». Для этих целей предполагается расширить сеть наземных РЛС (заменить устаревшие станции более современными), модернизировать линии связи, установить в центрах управления и оповещения новое радиоэлектронное оборудование. Проведение таких мероприятий уже начато, в частности на территории ФРГ, где разворачивается новая система управления ПВО «Гейдж» вместо устаревшей американской АСУ «412-L». В ее состав входят радиолокационные посты, центр управления и оповещения и линии передачи данных. Эта система будет получать также данные о воздушной обстановке от АСУ ПВО НАТО «Нейдж», а также от РЛС системы «Ларс».

Глава 10. РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ СРЕДСТВА СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ВОЙСКАМИ ПВО

Успех в выполнении задач по противодействию авиации противника в существенной степени определяется эффективностью применения автоматизированных систем управления ПВО и ее активных средств.

В свою очередь, эффективность применения автоматизированных систем управления войсками ПВО зависит от эффективности функционирования РЭС управления войсками. К указанным РЭС относятся: радиолокационные средства и системы обнаружения воздушных целей; радиолокационные системы опознавания государственной принадлежности; радиоэлектронные средства связи и передачи данных.

Применение этих радиоэлектронных средств и систем позволяет своевременно обнаруживать и опознавать воздушные цели, определять их координаты и скорость движения, передавать команды оповещения и целеуказания частям и подразделениям истребительной авиации, зенитных ракетных и ствольных комплексов.

10.1. Радиолокационные средства и системы обнаружения воздушных целей

Радиолокационные средства и системы обнаружения воздушных целей являются основными, а зачастую, по крайней мере, на больших дальностях — и единственными датчиками информации о воздушной обстановке систем управления ПВО, таких, как «Сейдж» (США), «Нейдж» (европейские страны НАТО), «Стрида» (Франция).

К рассматриваемым радиолокационным средствам и системам относятся: наземные РЛС обнаружения воздушных целей, РЛС обнаружения и наведения ИА, РЛС целеуказания ЗРК и ЗСК; назем-

ные загоризонтные РЛС дальнего обнаружения воздушных целей; наземные пассивные радиолокационные системы обнаружения воздушных целей; бортовые РЛС дальнего радиолокационного обнаружения воздушных целей.

Система обнаружения, образованная совокупностью наземных и бортовых радиолокационных средств, должна обеспечивать выдачу данных о воздушных целях во всем возможном диапазоне высот (от предельно малых — 30—50 м — до больших — 20—30 км), скоростей полета (от 200—300 км/ч до 2—3 тыс. км/ч) и широком диапазоне дальностей до них (от 500—700 км до нескольких километров). Иными словами, должно быть создано сплошное радиолокационное поле наблюдения в довольно большом диапазоне дальностей, высот и скоростей полета воздушных целей.

Практическая реализация этих требований к системе обнаружения представляет определенные трудности, так как дальность радиолокационного обнаружения воздушных целей в сантиметровом и дециметровом диапазонах радиоволн ограничивается, как известно, дальностью прямой видимости.

Обнаружение воздушных целей на малых высотах осложняется из-за воздействия на приемные устройства РЛС помех, вызванных интенсивными отражениями зондирующих сигналов от подстилающей земной поверхности и окружающих местных предметов.

Максимальная дальность действия РЛС при обнаружении низколетящей цели

$$D_{ц\ min} = \sqrt{\frac{4\pi H_{ц} H_A}{\lambda} D_p}, \quad (10.1)$$

где D_p — максимальная дальность действия РЛС без учета влияния земли; λ — длина волны РЛС.

Из выражения (10.1) видно, что дальность обнаружения низколетящих целей существенно уменьшается по сравнению с дальностью обнаружения целей на больших высотах.

Увеличение дальности действия РЛС при полетах целей на малых высотах, как это следует из выражения (10.1), может быть достигнуто увеличением высоты подъема H_A антенны РЛС и снижением влияния отражений от земной поверхности и местных предметов.

Высота подъема антенн РЛС может быть значительно увеличена при их установке на борту летательных аппаратов (самолетов, вертолетов, аэростатов, дирижаблей).

Снижение влияния отражений от земной поверхности достигается уменьшением уровня боковых лепестков диаграмм направленности антенны РЛС (на передачу и прием), а также применением схем селекции движущихся целей в импульсных когерентных РЛС и в РЛС с непрерывным излучением.

Ограничения, накладываемые на возможности обнаружения воздушных целей в широком диапазоне высот и дальностей, могут

Таблица 10.1

ТТД наземных РЛС систем ПВО стран НАТО

Обозначение или наименование РЛС	D_{max} , км	λ , см	Ω_A , об/мин	$\varphi_{0,5}^{аз}$, °	Тип антенны
	P_n , кВт	τ_n , мкс (F_n), Гц	$\Phi_{ум}$, °	$\varphi_{0,5}^{ум}$, °	Размеры (ширина × × высота)
Двухкоординатные РЛС (США)					
AN/FPS-19	200	23	6	1,3	A
	500	2; 4 (200; 400)	18	18	•
AN/FPS-20	300	23	До 10	1,3	A
	2500	6 (180—360)	21	21	•
AN/FPS-24	•	•	До 5	2,9	A
	5000	6; 18 (278)	30	30	•
AN/FPS-27	500	10	5	1,0	A
	15000	3; 6 (330)	34	34	•
Двухкоординатные РЛС (Великобритания)					
AR5	400	23	8	1,2	A
	2000	2—5 (270— 680)	40	40	14,4×5,4
S625	340	23	6	2,3	B
	2300×2	5 (290)	45	45	7,4×2,4
S631	400—700	10 и 23	6	0,55 и 1,2	B
	2250×2	5 (220)	30	30	14,4×4,5
S690	400—650	10 и 23	6	0,55 и 1,25	B
	3300×2	10 (220)	30	30	14,5×4,5
Трехкоординатные РЛС (США)					
AN/TPS-32	550	10	6	2,2	Г
	2200	30 (250— 1000)	20	0,9	3,1×8,2
AN/TPS-43E	400	19	6	1,1	B
	3000	6,5 (250)	20	20	6,2×4,3
AN/TPS-59	550	20	6; 12	3,2	Г
	35	30 (•)	20	1,6	2,3×4,6 (4,6×9,2)
AN/TPS-70	460	10	6	2	Г
	3000	(перемен- ная)	20	•	3,5×3,4

Обозначение или наименование РЛС	D_{\max} , км	λ , см	Ω_A , об/мин	$\varphi_{0,5}^{\text{аз}}$, °	Тип антенны
	P_n , кВт	τ_n , мкс (F_n), Гц	$\Phi_{\text{ум}}$, °	$\varphi_{0,5}^{\text{ум}}$, °	Размеры (ширина × высота)

Трехкоординатные РЛС (Великобритания)

S40	500	.	6	0,6	Б
	3000×2	10 (223—323)	30	30	.
S640	600	10	5	0,62	В
	3000×2	10 (250)	30	30	12,2×4,7
«Мартелло»	550	23	6	2,8	Г
	3300	• (270)	30	.	6×11
Тип 65	500	10	6	0,6	Б
	4000	• (200—300)	30	30	.

РЛС определения высоты полета целей (США)

AN/FPS-6	300	10	6	3,2	А
	5000	2—3 (300)	32	0,9	.
AN/FPS-26	400	5	5	2,3	А
	5000	4 (330)	.	.	.
AN/FPS-89	400	10	6	3,2	А
	4000	2 (400)	32	0,9	.

РЛС определения высоты полета целей (Великобритания)

HF-200	370	10	6	2,5	А
	2500	5,5 (250)	33	.	2,4×10,7
S613	230	5,5	18,5	3	А
	1000	5 (290)	.	0,9	1,3×4,3
S669	370	10	7—8	3,7	А
	2250	5 (220)	.	0,9	2,1×12,2

Примечания: 1. ЭПР цели принят равным 3 м².

2. Тип антенны: А — усеченный параболоид с одиночным облучателем, Б — усеченный параболоид с групповым облучателем, В — параболический цилиндр с линейным облучателем, Г — фазированная антенная решетка.

быть сняты или уменьшены при комплексном применении радиолокационных средств и систем, названных выше.

Основными первичными источниками информации о воздушной обстановке систем управления ПВО США и европейских стран НАТО являются наземные РЛС обнаружения и радиолокационные высотомеры различного типа, разработанные и принятые на воору-

жение в конце 50-х — начале 60-х гг. ТТД некоторых РЛС обнаружения систем ПВО стран НАТО приведены в табл. 10.1. В системах ПВО используются трех-, двух- и однокоординатные импульсные РЛС, работающие преимущественно в 10- и 23-см диапазоне радиоволн.

Трехкоординатные РЛС измеряют дальность до цели, ее азимут и угол места (высоту полета), а двухкоординатные — дальность и азимут. Двухкоординатные РЛС обычно работают совместно с радиолокационными высотомерами, определяющими только высоту полета цели.

Большинство РЛС обнаружения имеют довольно высокий уровень излучаемой импульсной мощности — от 1 до 10 МВт. Диаграммы направленности антенн узкие в азимутальной плоскости (от 0,5 до 3°) и широкие в угломестной плоскости (от 30 до 45°). Излучаемые РЛС импульсные последовательности имеют следующие параметры: длительность импульсов — от 3 до 10 мкс с частотами повторения 200—400 Гц. Для повышения помехоустойчивости в некоторых РЛС предусмотрено изменение параметров τ_n и F_n импульсной последовательности.

Высокий энергетический потенциал обеспечивает большую дальность действия РЛС — до 400—500 км на средних и больших высотах при эффективной поверхности рассеяния целей $\sigma_{\text{ц}}=3$ м². Для повышения помехозащищенности РЛС применяется плавная или дискретная перестройка рабочей частоты или одновременная работа на нескольких частотах.

Радиолокационные высотомеры (однокоординатные РЛС) работают в 5- и 10-сантиметровом диапазоне волн в импульсном режиме с довольно высокой излучаемой импульсной мощностью ($P_n=1\div 5$ МВт) с длительностями τ_n импульсов от 2 до 5 мкс и частотами повторения F_n импульсов 250—400 Гц. Антенны высотомеров имеют узкие диаграммы направленности в угломестной плоскости (примерно 1°) и более широкие — в азимутальной — 2,5—3°. Дальность действия высотомеров — 300—400 км.

На вооружении систем управления ПВО состоят импульсные когерентные и некогерентные РЛС. Недостатком импульсных некогерентных РЛС, как известно, является то, что при обработке отраженных сигналов в приемном устройстве не используется информация о цели, содержащаяся в структуре их высокочастотного заполнения (в частности, различие фаз и частот принимаемых и зондирующих сигналов).

В импульсных когерентных РЛС обработка последовательности отраженных сигналов производится с учетом структуры высокочастотного заполнения, что позволяет осуществить селекцию сигналов движущихся целей. Последняя повышает помехоустойчивость РЛС в условиях воздействия пассивных помех.

Для повышения помехоустойчивости РЛС обнаружения наряду с отмеченными применяются и другие методы и устройства:

— методы и устройства защиты приемных устройств от перегрузок (линейно-логарифмические усилители, схемы автоматической регулировки усиления);

— методы и устройства селекции полезных сигналов, основанные на наличии у помехового и полезного сигналов отличительных признаков по спектру, несущей частоте, виду модуляции, поляризации, времени и направлению прихода;

— методы снижения уровня боковых лепестков диаграмм направленности антенн;

— методы и устройства компенсации сигналов, принимаемых по боковым лепесткам диаграмм направленности антенн и т. д.

Как считают иностранные специалисты, состоящие на вооружении систем ПВО наземные РЛС обнаружения воздушных целей не отвечают современным требованиям по точности определения координат целей, разрешающей способности по дальности и угловым координатам. Кроме того, РЛС обнаружения имеют малые дальности обнаружения низколетящих и малоразмерных целей с эффективной отражающей поверхностью, равной единицам метров, и неудовлетворительную помехоустойчивость при воздействии помех, создаваемых противником.

В зарубежной печати отмечается, что улучшение тактико-технических характеристик наземных РЛС обнаружения будет вестись по следующим направлениям.

1. Дальнейшее увеличение энергетического потенциала РЛС. Это может быть достигнуто благодаря применению более мощных генераторов высокой частоты и (или) фазированных антенных решеток (ФАР). Применение мощных генераторов позволит создать РЛС с импульсной мощностью в несколько десятков мегаватт, а в режиме непрерывного излучения — с мощностью в несколько киловатт. Применение ФАР дает возможность вести обзор пространства в соответствии с заданной программой и тем самым рационально использовать энергию, излучаемую РЛС. Помимо этого, узкие диаграммы направленности ФАР позволяют повысить разрешающую способность РЛС по угловым координатам и точность определения угловых координат целей.

2. Использование сложных видов сигналов (частотно-модулированных, фазово-модулированных, шумоподобных) большой длительности и методов их оптимальной обработки.

Излучение зондирующих сигналов большой длительности (порядка 10 мкс) повышает энергетический потенциал РЛС. Оптимальная обработка отраженных сигналов обеспечивает подавление помех и увеличивает тем самым отношение мощности сигнала к мощности помехи. Вместе взятые, эти факторы приводят к увеличению дальности действия РЛС. Сжатие принимаемых импульсов до наносекундной длительности улучшает разрешающую способность РЛС по дальности. Если при этом в РЛС применяется ФАР, повышается и точность определения местоположения целей. Наряду с этим повышение разрешающей способности РЛС по угловым координатам и дальности позволяет определять не только координаты

боевого порядка в целом, но и отдельные самолеты боевого порядка.

3. Применение различных способов перестройки рабочей частоты излучаемых сигналов в широком диапазоне частот, в том числе по произвольному закону. Изменение частоты сигналов в широком диапазоне повышает помехозащищенность РЛС, так как при этом затрудняются разведка частоты сигнала и создание активных помех, прицельных по несущей частоте.

4. Использование различных видов поляризации излучаемых сигналов. Известно, что отражательная способность объектов (самолетов, вертолетов, земной поверхности, местных предметов) зависит от вида поляризации зондирующих сигналов. Таким образом, выбором вида поляризации можно увеличить мощность сигнала, отраженного от цели, и уменьшить мощность отражений от земной поверхности и местных предметов.

5. Создание адаптивных приемных систем на базе ФАР, позволяющих в значительной степени ослабить воздействие активных помех, принимаемых по боковым лепесткам диаграммы направленности антенны РЛС.

Указанные направления совершенствования РЛС воплощены в той или иной степени в РЛС: AN/TPS-59, AN/TPS-43E, AR-320, «Мартелло». Последняя рассматривается как основная РЛС для замены наземных РЛС обнаружения АСУ «Нейдж».

РЛС «Мартелло» предназначена для дальнего обнаружения и определения дальности, азимута и высоты полета целей. Станция излучает импульсы большой длительности ($\tau_{\text{и}} = 10$ мкс) с линейной частотной модуляцией внутри их. Предусмотрена быстрая перестройка рабочей частоты сигналов в довольно широком диапазоне. Ширина спектра излучаемых сигналов составляет 10% несущей частоты. Антенная система — плоская ФАР ($6 \times 10,5$ м) — формирует многолепестковую (8-лепестковую) диаграмму направленности, что позволяет определять высоту целей. Обзор пространства по азимуту осуществляется за счет механического вращения ФАР, по углу места — путем электрического сканирования диаграммы направленности антенны. Диаграмма направленности антенны имеет низкий уровень боковых лепестков (—30 дБ относительно уровня главного лепестка). Существенное снижение уровня боковых лепестков достигнуто благодаря рациональному амплитудно-фазовому распределению электромагнитного поля в раскрытии антенны. Ширина диаграммы направленности антенны по азимуту — $2,8^\circ$, по углу места — $1,5^\circ$. Коэффициент усиления антенны на передачу равен 32 дБ, на прием — 38 дБ.

Точность определения координат целей: по дальности — 10 м, по азимуту — 1000 м (на дальности 185 км), по высоте — 300 м (на дальности 185 км).

Дальность действия РЛС по цели с эффективной отражающей поверхностью $\sigma_{\text{ц}} = 1$ м² до 400 км (при вероятности обнаружения, равной 0,5, и вероятности ложной тревоги — 10^{-6}).

Как полагают зарубежные специалисты, наземные РЛС обнаружения воздушных целей, входящие в состав АСУ «Нейдж», «Сейдж» и других, создают сплошную зону радиолокационного наблюдения воздушного пространства на средних и больших высотах. На малых же высотах дальность обнаружения этих РЛС значительно меньше. Поэтому для обнаружения низколетящих целей применяют чаще всего специальные наземные импульсно-доплеровские РЛС, наземные загоризонтные РЛС обнаружения воздушных целей, а также РЛС, устанавливаемые на летательных аппаратах (самолетах, вертолетах, аэростатах, дирижаблях). Рассмотрим кратко указанные радиолокационные системы и средства.

На некоторых участках дополнительно к системе обнаружения АСУ «Нейдж» развернута система обнаружения низколетящих воздушных целей «Ларс». Основными радиолокационными средствами обнаружения системы являются мобильные импульсно-доплеровские РЛС типа MPDR-30/1 и MPDR-45 с дальностью обнаружения 30 и 45 км соответственно. РЛС системы располагаются таким образом, чтобы перекрыть зоны, не просматриваемые РЛС АСУ «Нейдж». Данные от РЛС системы поступают в центр сбора и обработки информации, а затем передаются на посты АСУ «Нейдж», в подразделения ЗУР и на посты ПВО сухопутных войск.

Для обнаружения низколетящих целей и передачи данных целеуказания системам зенитного огня (на пусковые установки зенитных подразделений «Чапэрэл», «Вулкан», в огневые расчеты «Рэд Ай», в дивизионы ЗРК «Хок» и др.) применяются радиолокационные системы. Одной из таких современных систем является американская система AN/MPQ-49 (FAAR). В ее состав включены: РЛС обнаружения AN/TPS-32, запросчик опознавания AN/TPX-50 и УКВ-радиостанция AN/VRC-46.

Импульсно-доплеровская РЛС AN/TPS-32 работает в диапазоне частот 390—1550 МГц и позволяет обнаруживать цели на малых высотах на дальностях 16—20 км.

Непосредственно в интересах подразделений ЗРК и ЗСК во многих капиталистических странах созданы когерентные импульсно-доплеровские РЛС, способные обнаруживать низколетящие цели на дальностях 15—20 км. Эти РЛС входят в состав ЗРК и ЗСК (ЗРК «Рапира», «Кроталь», «Скайгارد-М», «Скайгارد-Спарроу», ЗСУ «Гепард» и др.), работают в различных диапазонах частот (1700, 2400, 1000 МГц) с импульсной мощностью в несколько киловатт и с длительностями импульсов в пределах 0,3—3 мкс.

Возможности системы обнаружения значительно увеличиваются при применении загоризонтных РЛС (ЗГ РЛС). Они способны обнаруживать воздушные цели далеко за пределами дальности прямой видимости (на дальностях до нескольких тысяч километров, во всем возможном диапазоне высот полета целей — от предельно малых до больших).

В основу функционирования ЗГ РЛС положена способность электромагнитных волн ДКВ-диапазона (10—100 м) последовательно и многократно отражаться от ионосферы и от земной поверх-

ности. Воздушные цели, находящиеся на пути распространения радиоволн, отражают их. Отраженный сигнал распространяется в обратную сторону по той же траектории, что и зондирующий сигнал.

Для обнаружения воздушных целей применяются ЗГ РЛС наклонно-возвратного зондирования. Первая американская экспериментальная ЗГ РЛС MADRE работала в импульсном режиме излучения с длительностью $t_{\text{и}}$ импульса, равной 100 мкс, средней излучаемой мощностью 5—50 кВт в диапазоне частот 3—30 МГц. Разрешающая способность РЛС по дальности была равна примерно 15—40 км, а точность измерения дальности составляла 10—20 км. Для выделения сигналов, отраженных от воздушных целей, на фоне интенсивных отражений от земной поверхности в ЗГ РЛС наряду с доплеровской селекцией используется накопление полезных сигналов (время накопления выбирают равным примерно 1 с).

По оценке американских специалистов, перспективные ЗГ РЛС обнаружения воздушных целей будут иметь такие основные характеристики: дальность действия — 800—4000 км, средняя излучаемая мощность — 1 МВт, ошибка определения дальности — не менее 10—20 км, ошибка измерения азимута — 0,12—1°. Ожидается принятие на вооружение ЗГ РЛС некоторыми капиталистическими странами.

Одним из возможных решений проблемы обнаружения воздушных целей на больших дальностях, в том числе и низколетящих, является установка РЛС обнаружения на летательных аппаратах (самолетах, вертолетах, аэростатах, дирижаблях). Увеличение высоты подъема антенны РЛС расширяет зону обнаружения воздушных целей как за счет увеличения дальности прямой видимости, так и за счет уменьшения влияния отражений от подстилающей земной поверхности и местных предметов.

На вооружении систем ПВО ряда капиталистических стран имеются самолеты с системами дальнего радиолокационного обнаружения (ДРЛО). Наиболее совершенными из известных в настоящее время систем являются самолетные радиолокационные системы дальнего обнаружения и управления АВАКС (США) и «Нимрод» (Великобритания).

Система АВАКС — составная часть общей системы ПВО Северо-Американского континента и АСУ «Нейдж».

Система АВАКС должна решать задачи по обнаружению и опознаванию воздушных целей во всем диапазоне высот их полета в радиусе 300—700 км. Предусмотрены передача информации о воздушных целях на наземные командные пункты и управление наведением самолетов на воздушные и наземные цели. Для решения указанных задач на борту самолета Е-3А устанавливается автоматизированная система сбора, обработки и передачи информации. В состав этой системы входят следующие РЭС:

- импульсно-доплеровская РЛС;
- радиолокационная система опознавания государственной принадлежности воздушных целей;

— аппаратура радиотехнической разведки, позволяющая получать дополнительную информацию о воздушной и наземной обстановке по результатам разведки сигналов, излучаемых наземными и бортовыми РЭС противника;

— приемно-передающая аппаратура для передачи информации по линиям «самолет ДРЛО — истребители-перехватчики», «самолет ДРЛО — самолеты ДРЛО группы», «самолет ДРЛО — наземные командные пункты».

Все названные РЭС являются уязвимыми звеньями системы АВАКС, так как их приемные устройства подвержены воздействию помех. Снижение эффективности функционирования каждого из этих РЭС снижает эффективность функционирования системы в целом, поэтому вполне естественно, что приняты меры по повышению помехозащищенности всех РЭС.

Важнейшей составной частью системы АВАКС является бортовая импульсно-доплеровская РЛС AN/APY-1 с фазированной антенной решеткой и цифровой системой обработки отраженных сигналов. РЛС способна обнаруживать, сопровождать воздушные цели, в том числе летящие на малой высоте, и выдавать информацию об их дальности, азимуте и высоте. Она имеет несколько режимов работы, которые могут включаться во время одного оборота антенны на различных азимутальных направлениях относительно продольной оси самолета:

— импульсный — РЛС излучает периодическую последовательность импульсов большой длительности с низкой частотой повторения. Сигналы, отраженные от целей, подвергаются в приемном устройстве станции сжатию. Сжатие импульсов обеспечивает высокую разрешающую способность РЛС по дальности и точность определения дальности до цели. Импульсный режим применяется для дальнего обнаружения целей, расположенных выше линии горизонта, т. е. в том случае, когда влияние отражений от земной поверхности незначительно;

— импульсно-доплеровский без сканирования и со сканированием диаграммы направленности антенны РЛС в угломестной плоскости. Режим без сканирования применяется для первоначального обнаружения целей на фоне подстилающей земной поверхности, а со сканированием по углу места ($+30^\circ$) — для определения высоты полета целей. В импульсно-доплеровском режиме РЛС излучает периодическую последовательность импульсов с высокой частотой повторения. Этот режим используется для обнаружения воздушных целей на малых высотах на фоне земной поверхности путем селекции движущихся целей. Обработка принятых сигналов осуществляется в узкополосных доплеровских фильтрах, что позволяет устранить влияние отражений от земной поверхности;

— комбинированный. В этом режиме для обнаружения воздушных целей на больших высотах применяется импульсный режим, а на малых — импульсно-доплеровский;

— режим пеленгации источников активных помех. В этом

режиме передатчик РЛС выключен и определяется направление на самолет — постановщик помех. При длительной работе передатчика помех триангуляционным методом определяется его местоположение.

РЛС AN/APY-1 имеет высокую помехозащищенность, которая достигнута благодаря применению антенн с низким уровнем излучения и приема в направлении боковых лепестков ее диаграммы направленности; доплеровской селекции целей; высокостабильных схем генерирования сигналов с кварцевой стабилизацией; цифровой обработки принимаемых сигналов; быстрой перестройки несущей частоты излучаемого сигнала и многочастотного режима работы; переменной частоты повторения импульсов.

РЛС AN/APY-1 обеспечивает обнаружение крупных воздушных целей (тяжелых бомбардировщиков) на больших и средних высотах полета на дальностях до 700 км, а на малых высотах — до 400 км, дальность обнаружения тактических истребителей на больших и малых высотах — 450 и 320 км соответственно.

Эффективность функционирования системы обнаружения, а следовательно, и системы управления ПВО может быть значительно снижена при ведении противоборствующей стороной радиоэлектронной борьбы. Воздействие активных и пассивных помех на РЭС системы обнаружения ухудшает их основные тактические показатели: дальность действия, разрешающую способность по дальности и угловым координатам, точность определения координат и местоположения воздушных целей. При создании помех наземным и бортовым РЛС обнаружения местоположение воздушных целей может определяться с помощью пассивных радиолокационных систем обнаружения. В пассивных системах используются сигналы, излучаемые средствами, устанавливаемыми на борту воздушных целей.

Определение координат и местоположения целей осуществляется путем приема сигналов в нескольких (как минимум в двух) пространственно разнесенных точках. В результате обработки сигналов, принятых в одной точке, могут быть определены угловые координаты источника излучения. При совместной обработке сигналов, принятых в разнесенных точках, измеряется разность расстояний от источника до точек приема. Наличие указанных данных позволяет определить местоположение воздушной цели.

Для определения местоположения источников излучения могут использоваться триангуляционный (угломерный), разностно-дальномерный и угломерно-разностно-дальномерный методы.

В основу триангуляционного метода положено определение направлений на источник излучения как минимум в двух пространственно разнесенных точках приема.

При разностно-дальномерном методе измеряются разности расстояний от источника излучения до точек приема. Координаты воздушной цели рассчитываются по разностям расстояний минимум до трех точек приема.

Угломерно-разностно-дальномерный метод основан на определении направлений на источник излучения в каждой приемной точке и разности расстояний от источника до приемных точек. Местоположение воздушной цели в этом случае может быть определено при приеме сигналов в двух точках. Пассивные системы эффективно функционируют при наличии небольшого количества источников излучения. При увеличении числа источников в системе появляется неоднозначность определения их местоположения: наряду с определением местоположения истинных источников фиксируется наличие и ложных, несуществующих. Указанная неоднозначность может устраняться за счет получения избыточной информации о координатах целей.

10.2. Радиоэлектронные средства связи и передачи данных

Для обмена информацией между различными звеньями (органами) систем управления ПВО применяется радиорелейная, тропосферная, радио- и спутниковая связь.

Радиорелейная связь используется для передачи больших потоков информации. Система радиорелейной связи представляет собой совокупность ретрансляторов (приемно-передающих устройств), устанавливаемых на определенных расстояниях один от другого на требуемых направлениях. Этот вид связи обладает высокой скрытностью и помехоустойчивостью. Это объясняется прежде всего тем, что для приема и передачи информации используются антенны с узкими диаграммами направленности. Системы радиорелейной связи работают в сантиметровом и дециметровом диапазонах радиоволн.

Тропосферная связь является разновидностью радиорелейной связи со значительно большими расстояниями между радиостанциями (ретрансляционными пунктами). Системы тропосферной связи работают обычно в УКВ-диапазоне радиоволн. Увеличение дальности связи (за пределами прямой видимости) обеспечивается за счет использования явления рассеянного отражения радиоволн УКВ-диапазона от нижних слоев атмосферы — тропосферы (высота 10—12 км). Тропосферная связь может быть прямой, т. е. без ретрансляции, или с многократной ретрансляцией. Дальность прямой связи — около 150—300 км, а с ретрансляцией — 10 000 км.

Радиорелейные и тропосферные средства связи входят в состав различных органов управления. Так, например, в состав средств связи центра управления тактической авиации АСУ «407-L» входят радиорелейная станция (узел передачи данных AN/GSQ-119) и радиостанция тропосферной связи AN/TRC-97A. С использованием этих средств осуществляется передача различных данных (в аналоговой и цифровой форме), телефонная, телеграфная и буквопечатная связь.

Одним из наиболее оперативных видов связи, несмотря на ограниченную пропускную способность и уязвимость к воздействию по-

мех, является радиосвязь. Большая дальность связи, быстрота ее установления, возможность поддержания связи через пространства, недоступные для войск, и с подвижными объектами делают радиосвязь очень важным, а иногда и единственным средством, с помощью которого можно осуществлять управление.

На самолетах и вертолетах ВВС стран НАТО устанавливаются средства КВ- и УКВ-радиосвязи. Средства КВ-радиосвязи применяются для связи на большие дальности (1000—2000 км) и устанавливаются на тяжелых самолетах, в том числе на самолетах ДРЛО. Средства УКВ-радиосвязи используются для обеспечения командной радиосвязи в пределах прямой видимости в звеньях «воздух — воздух» и «земля — воздух» и устанавливаются на всех самолетах ВВС. УКВ-радиостанции работают в диапазоне частот 225—400 МГц на фиксированных частотах.

Одной из современных УКВ-радиостанций является американская радиостанция AN/ARC-144. Она предназначена для установки на самолетах F-15, F-16 и отличается высокой стабильностью и точностью установки рабочей частоты. Станция обеспечивает двустороннюю телефонную связь, автоматическую ретрансляцию и работу в линиях передачи данных с частотной манипуляцией и временным уплотнением каналов.

Глава 11. РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ СРЕДСТВА СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ОРУЖИЕМ ПВО

11.1. Радиоэлектронные средства систем управления ракетами и самолетами стран НАТО

11.1.1. Принципы построения и обобщенные структурные схемы систем радиоуправления ракетами и самолетами

ЗРК, истребители-перехватчики (ИП) ПВО, а также большинство ударных самолетов вооружены управляемыми ракетами (УР) и управляемыми бомбами (УБ), которые обеспечивают высокую вероятность поражения целей. Управление движением УР, самолетов и других управляемых объектов (УО) обеспечивается с помощью систем радиоуправления (РУ). В зависимости от назначения различают системы РУ движением УО и системы РУ боевыми частями. Системы РУ движением осуществляют непрерывную коррекцию траектории полета и выводят УО к цели или в заданный район. Системы РУ боевыми частями обеспечивают подрыв их у целей.

Управление движением УО сводится к выдерживанию требуемых значений курса и высоты (тангажа) полета. В результате управления УО движется по заданной траектории. Траектория, по которой должен двигаться УО при выполнении заданного закона сближения, принято называть кинематической или опорной. Наиболее рациональными считаются те методы наведения, при которых опорная траектория наименее криволинейна, а их техническая реализация метода наиболее проста.

Различают методы наведения УО по фиксированным и нефиксированным траекториям. При движении УО по фиксированным траекториям его параметры движения могут быть определены до старта. При наведении по нефиксированным траекториям параметры УО не могут быть определены заранее. УР, ИП и УБ наводятся по нефиксированным траекториям. В процессе наведения УО могут участвовать движения двух (УО и цели) или трех точек (УО, цели и пункта управления — ПУ).

При полете на УО действуют различные факторы, вызывающие отклонение его движения от заданного. Мету нарушения заданного условия принято называть параметром рассогласования: $\Delta(t) = a(t) - b(t)$. Здесь $a(t)$ и $b(t)$ — заданный и фактический законы движения УО.

Параметр рассогласования $\Delta(t)$ является входным воздействием системы РУ УО. Текущее значение $\Delta(t)$ измеряется координатором, в состав которого могут входить РЭС, установленные на УО и ПУ. Если измерение осуществляется на УО, общая структурная схема системы РУ по курсу и высоте имеет вид, изображенный на рис. 11.1, а. Если определение $\Delta(t)$ осуществляется на ПУ, система РУ строится по схеме, приведенной на рис. 11.1, б.

Входные воздействия для координаторов образуются кинематическими звеньями КЗ-1 — КЗ-3, свойства которых определяются уравнениями движения УО и цели (рис. 11.1, а) или ПУ, УО и цели (рис. 11.1, б). В результате измерения $\Delta(t)$ на выходе координатора формируются сигналы рассогласования (управления) u_y для каналов курса и высоты.

Если аппаратура координатора размещается на УО, в автоматических системах выходные сигналы u_y поступают на исполнительное устройство ИУ (рис. 11.1, а). В неавтоматических системах эти сигналы отображаются на индикаторах и используются оператором при выработке команд управления. В этих системах оператор выполняет функции устройства формирования и передачи команд УФПК. Если аппаратура координатора располагается на ПУ, выходные сигналы координатора с помощью УФПК преобразуются в команды управления, которые передаются на ИУ (рис. 11.1, б).

Часть аппаратуры координатора может размещаться на беспилотном УО. Тогда измеренные координаты и параметры движения цели передаются с УО на ПУ, где отображаются на индикаторе. В этом случае формирование команды управления обеспечивается оператором. Команды управления с помощью устройства передачи команд УПК передаются на ИУ УО. ИУ предназначено для перемещения рулевых органов УО на угол δ , пропорциональный $\Delta(t)$. Под действием рулей изменяется направление полета УО. При этом действительные параметры траектории УО изменяются так, что уменьшается $\Delta(t)$. В качестве ИУ может использоваться автопилот, обеспечивающий стабилизацию углового положения УО и управление движением его центра масс. На вход автопилота поступают сигналы управления с координатора или УФПК. Для улучше-

ния динамических свойств системы РУ на автопилот воздействуют также дополнительные сигналы управления ДСУ.

УО в системах РУ представляет собой объект автоматического регулирования. Входными воздействиями УО являются перемещения рулей, а выходными сигналами — угловые положения продольной оси УО или вектора его скорости движения в плоскости курса и высоты.

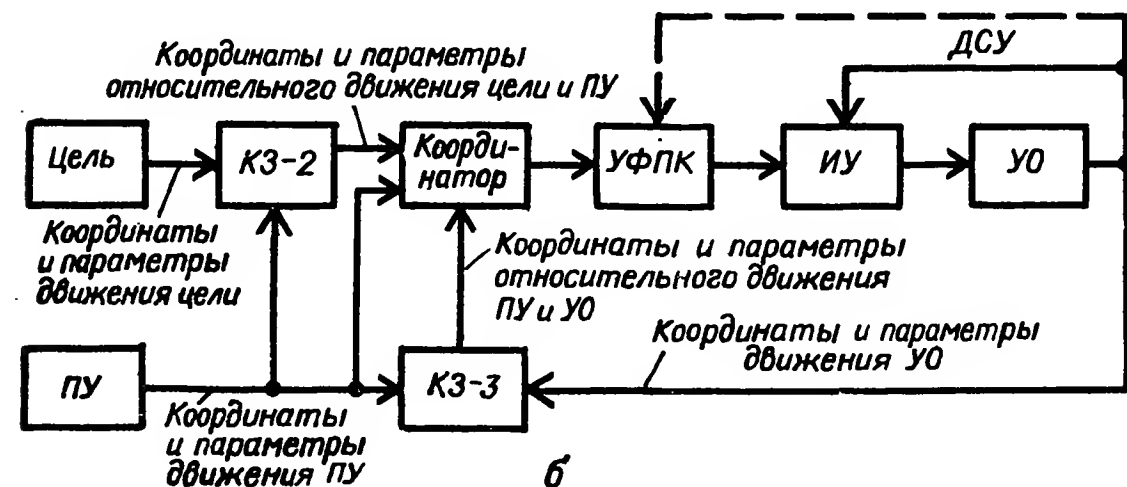
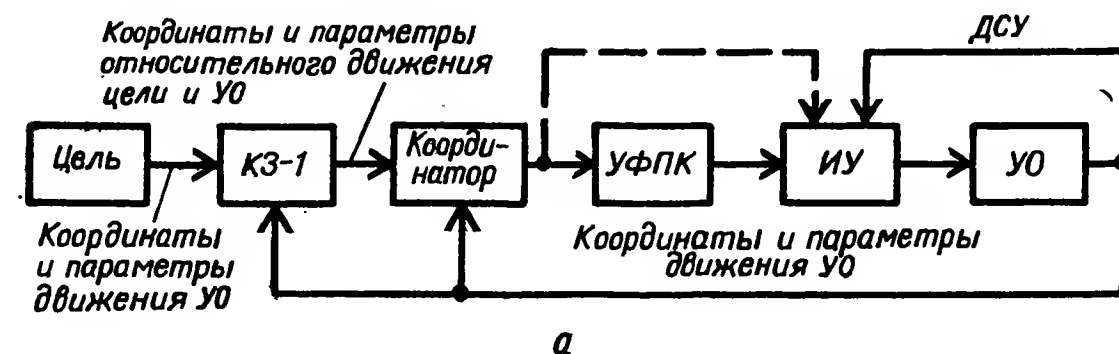


Рис. 11.1. Структурная схема системы радиоуправления, если определение параметра рассогласования осуществляется на УО (а), на пункте управления (б)

Вместе с изменением параметров движения УО под действием команд управления и ДСУ происходит изменение $\Delta(t)$ в плоскостях курса и высоты. При этом системы РУ строятся так, чтобы параметры рассогласования в обеих плоскостях все время оставались близкими к нулю.

11.1.2. Методы наведения управляемых объектов

Методом наведения УО называется заданный закон его сближения с целью. При идеальном наведении УО $\Delta(t) = 0$. При отклонении УО от заданной (опорной) траектории $\Delta(t) \neq 0$. Зависимость $\Delta(t)$ от координат называется уравнением рассогласования. Каж-

дому виду уравнения рассогласования соответствует вполне определенный метод наведения.

В системах РУ используются двух- и трехточечные методы наведения. При двухточечных методах в образовании параметра рассогласования участвуют две точки (цели и УО). При трехточечных методах наведения в формировании параметра рассогласования участвуют три точки (цель, УО и ПУ).

Двухточечные методы наведения. Среди двухточечных методов наиболее известными являются методы прямого наведения, погони, параллельного и пропорционального сближения. При методе прямого наведения продольная ось УО $O_p x_1$ совмещается с линией УО — цель (рис. 11.2, а). При методе погони с лини-

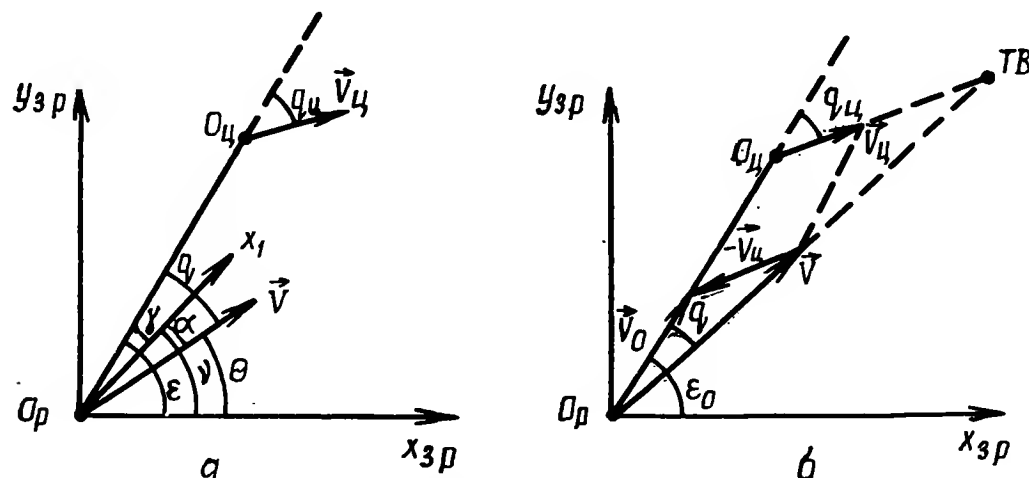


Рис. 11.2. Двухточечные методы наведения УО на цель: прямой метод и метод погони (а); метод параллельного сближения (б)

ей УО — цель совмещается вектор воздушной скорости УО \vec{V} . При малых углах атаки α и скольжения эти два метода по своим свойствам близки один к другому. Уравнениями идеальной связи для этих методов при наведении в вертикальной плоскости являются равенства: $\gamma = \epsilon - \nu$; $q = \epsilon - \Theta$. Здесь ν — угол тангажа, ϵ — угол наклона линии УО — цель, Θ — угол наклона вектора воздушной скорости УО. Уравнения рассогласования при прямом методе наведения и методе погони имеют вид

$$\Delta_{пр} = \gamma; \Delta_{пт} = q. \quad (11.1)$$

Текущее значение угла измеряется часто бортовым следящим угломерным устройством. Для определения угла q в состав угломерного устройства входит также измеритель угла атаки α . В следящих угломерных устройствах ось $O_p x_1$ все время должна быть направлена по линии $O_p O_c$. Ось может быть задана равносигнальным направлением РСН системы АСН РЛС.

При наведении УО на подвижные цели методом прямого наведения или погони его траектория имеет значительную кривизну. УО может испытывать большие перегрузки, что ограничивает применение этих методов. При методе параллельного сближения линия

УО — цель должна перемещаться параллельно первоначальному положению (рис. 11.2, б). Если в момент старта УО линия $O_p O_c$ имела угол наклона ϵ_0 , то при сближении УО с целью линия $O_p O_c$ должна иметь постоянный угол наклона и не должна вращаться. В этом случае УО наводится на цель с углом упреждения

$$q_T = \arcsin \left(\frac{V_u}{V} \sin q_u \right),$$

где q_u — угол наклона вектора \vec{V}_u к линии УО — цель.

Уравнениями рассогласования для этого метода являются

$$\Delta_\epsilon = \dot{\epsilon}; \quad \Delta_q = q - \arcsin \left(\frac{V_u}{V} \sin q_u \right). \quad (11.2)$$

Текущее значение $\dot{\epsilon}(t)$ измеряется следящим угломерным устройством.

При методе пропорционального наведения нормальное ускорение j_{n_T} или перегрузка n_T , развиваемые УО, должны быть пропорциональны $\dot{\epsilon}$. Для этого метода уравнениями идеальной связи являются равенства:

$$j_{n_T} = N \dot{\epsilon}; \quad n_T = \frac{N}{g} \dot{\epsilon},$$

где N — коэффициент пропорциональности; g — ускорение свободного падения.

Уравнения рассогласования для метода пропорционального наведения имеют вид

$$\Delta_{пн} = N \dot{\epsilon} - j_n; \quad \Delta'_{пн} = \frac{N \dot{\epsilon}}{g} - n.$$

Коэффициент N выбирается либо постоянным, либо изменяется в зависимости от скорости сближения $V_{сбл}$ УО с целью. В последнем случае уравнения рассогласования записываются в виде

$$\Delta_{пн} = N_0 V_{сбл} \dot{\epsilon} - j_n; \quad \Delta'_{пн} = \frac{N_0}{g} V_{сбл} \dot{\epsilon} - n, \quad (11.3)$$

где $N_0 = 3 \div 5$ — безразмерный коэффициент.

По своим свойствам метод пропорционального наведения занимает промежуточное положение между ранее рассмотренными методами. В состав координатора, реализующего метод пропорционального наведения, должны входить измерители угловой скорости линии визирования, скорости сближения УО с целью и нормального ускорения. Метод пропорционального наведения используется для управления по курсу и тангажу УР, УБ и других объектов.

Для самонаведения ИП используются методы прямого наведения и наведения в наивыгоднейшую точку встречи (НТВ). Прямой метод используется, как правило, в режиме прицеливания, когда антенны головок самонаведения (ГСН) ракет закрепляются неподвижно и ориентируются по продольной оси ракеты, что облегчает

захват цели на автосопровождение. Если при прицеливании антенна ГСН устанавливается независимо от продольной оси ракеты, используется метод наведения ИП в НТВ.

Если предположить, что движение цели, ИП и ракеты после ее пуска является прямолинейным и равномерным, то уравнение связи имеет вид

$$q_T = \frac{D_{иц}}{V_{и} + V_p} \dot{\epsilon}, \quad (11.4)$$

где q_T — требуемый угол упреждения истребителя; $D_{иц}$ — удаление цели от истребителя; $\dot{\epsilon}$ — угловая скорость линии визирования истребитель — цель; $V_{и}$ — скорость самолета; V_p — скорость ракеты относительно самолета.

Уравнение рассогласования в одной из плоскостей при этом методе имеет вид

$$\Delta_{нт} = q_T - q, \quad (11.5)$$

где q — фактический угол упреждения истребителя.

Данные для вычисления по формуле (11.5) вводятся от бортовой РЛС, пилотажно-навигационных приборов или задаются в виде постоянных величин.

Трехточечные методы наведения. При наведении УО трехточечными методами могут использоваться метод совмещения и метод параллельного сближения. Метод совмещения требует, чтобы при наведении УО находился на линии ПУ — цель

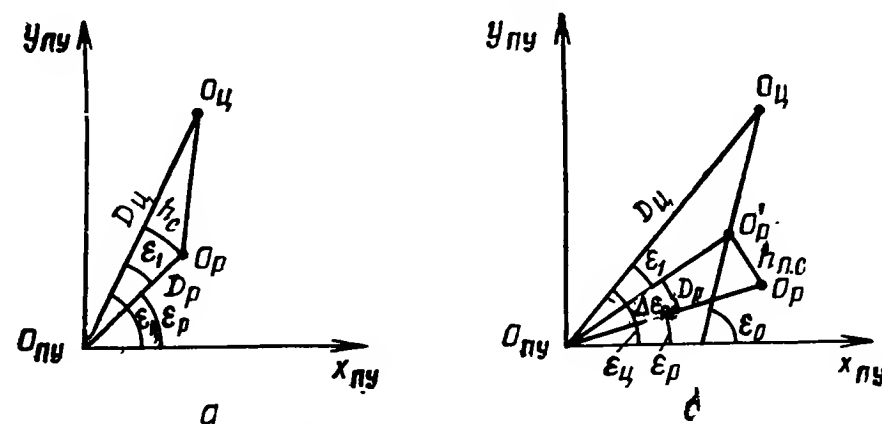


Рис. 11.3. Трехточечные методы наведения: метод совмещения (а); метод параллельного сближения (б)

(рис. 11.3, а). Для этого метода уравнениями идеальной связи являются:

$$\epsilon_1 = 0; h_c = 0.$$

При небольших ошибках наведения уравнения рассогласования для метода совмещения имеют вид

$$\Delta_c = \epsilon_1 = \epsilon_c - \epsilon_p; \Delta_c = h_c \approx D_p \epsilon_1, \quad (11.6)$$

где h_c — линейное отклонение УО от линии ПУ — цель.

В состав координатора, реализующего метод совмещения, должны входить измерители углов ϵ_c и ϵ_p или измеритель угла ϵ_1 , а также измеритель дальности D_p . Если скорость УО постоянна, измеритель может быть заменен программным устройством. К недостаткам метода совмещения относят значительную кривизну траектории при стрельбе по скоростным целям, что снижает точность наведения.

Трехточечный метод параллельного сближения требует, чтобы в течение всего времени наведения линия УО — цель перемещалась параллельно самой себе (рис. 11.3, б). При этом угол наклона линии УО — цель равен ϵ_0 . Уравнениями идеальной связи для этого метода являются $\Delta_{пс} = 0; h_{пс} = 0$. При малых ошибках наведения уравнения рассогласования имеют вид

$$\Delta_{пс} = \epsilon_c - \epsilon_p - \epsilon_1; h_{пс} \approx D_p \Delta_{пс}. \quad (11.7)$$

Неизвестный угол упреждения ϵ_1 находится из треугольника $O_{пу}O_цO'_p$ по формуле

$$\epsilon_1 = \arcsin \left[\frac{D_{пу}}{D_p} \sin(\epsilon_0 - \epsilon_c) \right]. \quad (11.8)$$

На практике наиболее высокие точности требуются при малых расстояниях. В этом случае $D_{пу}/D_p \ll 1$; $\epsilon_0 - \epsilon_c \approx 20 \div 30^\circ$; $D_{пу} \approx D_c - D_p$, и уравнения (11.7) принимают вид

$$\left. \begin{aligned} \Delta_{пс} &\approx \epsilon_c - \epsilon_p - \frac{D_c - D_p}{D_p} (\epsilon_0 - \epsilon_c); \\ h_{пс} &\approx D_p (\epsilon_c - \epsilon_p) - (D_c - D_p) (\epsilon_0 - \epsilon_c). \end{aligned} \right\} \quad (11.9)$$

Из уравнений (11.9) следует, что для наведения УО по методу параллельного сближения необходимо измерять не только угловые координаты ϵ_c и ϵ_p , но и дальности до УО и цели, что усложняет координатор системы радиуправления. При методе параллельного сближения траектория полета УО более прямолинейна, что увеличивает точность наведения и дальность стрельбы.

Наряду с рассмотренными трехточечными методами наведения используются промежуточные методы, при которых уравнения рассогласования записываются в виде

$$\Delta_{спр} = \epsilon_c - \epsilon_p - C_{спр}(D_c - D_p); h_{спр} \approx D_p \Delta_{спр}, \quad (11.10)$$

где $\Delta_{спр}$ — угол между требуемым и действительным направлением линии ПУ — УО, $C_{спр}$ — коэффициент пропорциональности. По своим свойствам промежуточные методы близки к методу параллельного сближения и проще реализуемы на практике. На ПУ могут вырабатываться не параметры рассогласования, а заданные параметры движения УО. В этом случае возможна также реализация методов, аналогичных двухточечным методам погони, пропорционального наведения и др.

11.1.3. Принципы действия систем самонаведения

По способам получения информации о целях системы РУ делятся на неавтономные, автономные и комбинированные. В неавтономных системах для формирования измеренного значения Δ_i используются сигналы, которые в общем случае поступают от цели, УО и ПУ. Для функционирования автономных систем эти сигналы не нужны. Комбинированные системы РУ представляют собой совокупность автономных и неавтономных систем управления с различными принципами действия. К неавтономным системам РУ относятся системы самонаведения, системы управления по радиолучу, системы командного управления и их комбинации.

Система самонаведения характеризуется тем, что параметр $\Delta(t)$ формируется на УО по сигналам, поступающим от цели. Координатор системы самонаведения (головка самонаведения ГСН ракеты) имеет чувствительный элемент, воспринимающий излучение цели. При этом цель может быть источником первичных или вторичных (отраженных) сигналов. В зависимости от того, где размещается первичный источник излучения, различают активные, полуактивные и пассивные системы самонаведения.

Активные ГСН характеризуются тем, что источник излучения, облучающий цель, и приемник отраженных от нее сигналов располагаются на УО. ГСН ракеты с большой дальностью пуска при активном самонаведении имеет большие габариты и массу, так как в его состав входит передатчик. Достоинством этих систем является их автономность. В полуактивных системах самонаведения передатчик (станция подсвета цели — СПЦ) располагается на ПУ. На УО размещается лишь приемная аппаратура, имеющая сравнительно небольшие размеры и массу.

Пассивные системы самонаведения используют сигналы, излучаемые самой целью. Цель может быть источником радиоизлучения, вызванного работой установленных на ней РЭС, а также источником тепловой и световой энергии. Достоинствами пассивных систем являются их автономность и скрытность, а недостатками — зависимость от работы РЭС цели. При выключении РЭС цели может произойти срыв процесса наведения УО.

Возможно применение комбинированных систем самонаведения, которые представляют собой комбинации перечисленных систем. Комбинированные системы самонаведения могут быть активно-пассивными, полуактивно-пассивными и полуактивно-активными. Такие системы обладают большой дальностью, высокой помехозащищенностью при приемлемых габаритах и массе.

ГСН осуществляет обнаружение, селекцию цели и вырабатывает сигналы $\Delta(t)$ для каналов курса и тангажа. Под действием этих сигналов обеспечивается управление движением УО при сближении его с целью. В системах самонаведения используются двухточечные методы наведения. Обобщенная структурная схема системы самонаведения изображена на рис. 11.4. Входным воздействием ГСН являются координаты и параметры движения линии визирования

УО — цель. Выходными сигналами ГСН являются напряжения (токи), характеризующие несоответствие между действительным направлением продольной оси УО и тем направлением, которое однозначно связано с законом движения линии визирования. ГСН имеет в своем составе автоматические устройства сопровождения цели (АСЦ) по направлению (АСН) и дальности (АСД) или скорости сближения (АСС).

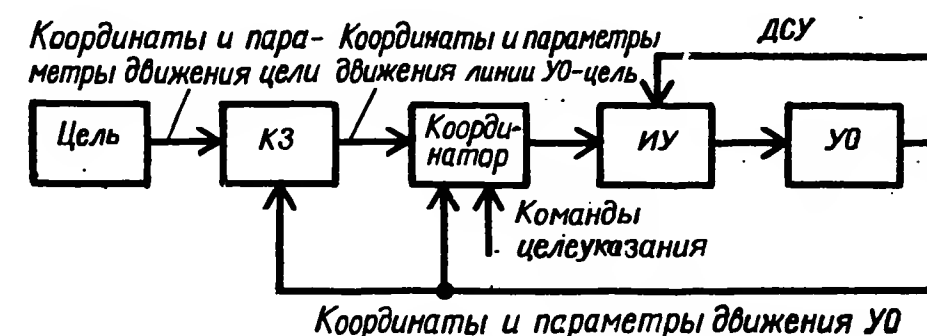


Рис. 11.4. Обобщенная структурная схема системы самонаведения

В состав координатора системы самонаведения самолета входят РЛС, пилотажно-навигационные приборы и вычислитель. При этом возможно ручное управление путем непосредственного воздействия на рули самолета или автоматическое управление с использованием автопилота. На координатор от других датчиков могут поступать команды целеуказания, облегчающие захват цели на автосопровождение.

11.1.4. Принцип действия системы управления по радиолучу

В системах управления по радиолучу используются трехточечные методы наведения. В таких системах необходимая траектория движения УО задается с ПУ, например, с помощью равносигнального направления (РСН) РЛС.

Если УО находится на РСН, создаваемом методом конического сканирования ДНА РЛС ПУ, на вход приемника УО поступают немодулированные по амплитуде радиосигналы. Отклонение УО от РСН приводит к появлению АМ принимаемых сигналов. Как и в АСН с коническим сканированием, глубина АМ при этом определяется пропорциональной величине отклонения УО от РСН, а фаза огибающей определяет направление отклонения УО. Чтобы измерить на УО $\Delta(t)$, на него передается опорный сигнал с частотой сканирования антенны путем кодирования излучаемых РЛС радиосигналов, например модуляцией импульсов по частоте повторения. Типовая структурная схема системы управления по радиолучу показана на рис. 11.5.

Входным воздействием РЛС являются параметры движения линии ПУ — цель. Пространственное положение этой линии, на которой должен находиться УО, зависит от относительного движения цели и ПУ. Эта зависимость отображена кинематическим звеном КЗ-1. Движение линии ПУ — цель воспринимается РЛС ПУ и преобразуется в движение РСН. Центр масс УО должен находиться в процессе наведения на линии ПУ — цель. Положение линии ПУ — УО зависит от взаимного перемещения ПУ и УО, что отображается кинематическим звеном КЗ-2. На это звено воздействуют абсолютные движения ПУ и УО. Входным воздействием для радиоаппаратуры УО (РУО) является угол между РСН и линией ПУ — УО.

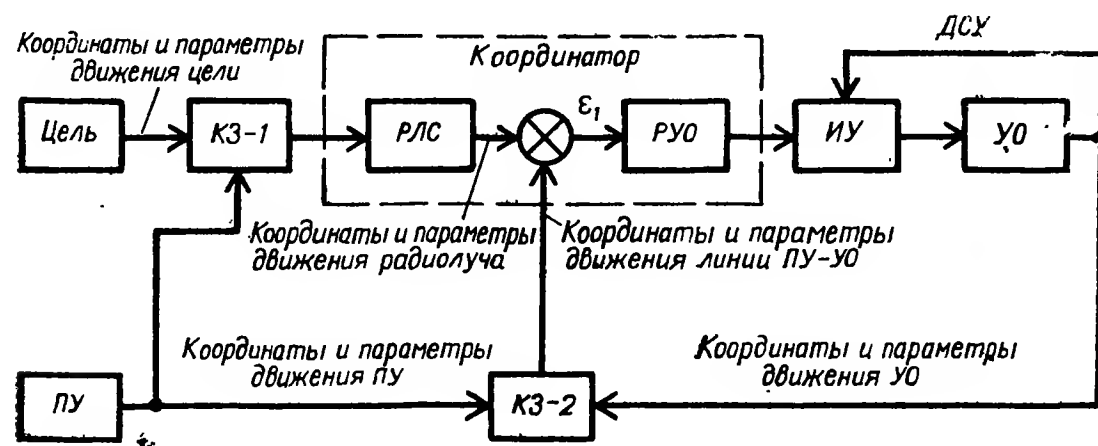


Рис. 11.5. Типовая структурная схема управления по радиолучу

В блоке радиоаппаратуры УО вырабатываются напряжения (токи), пропорциональные линейным отклонениям УО от РСН в двух взаимно перпендикулярных плоскостях управления. Из этих напряжений в ИУ формируются сигналы, под действием которых производится отклонение органов управления так, чтобы УО удерживался на РСН.

РЭС, расположенные на УО, образуют самостоятельную следящую систему, которая сопоставляет движение РСН и УО. Если УО наводится в упреждающую точку встречи трехточечным методом параллельного сближения, то помимо РЛС АСЦ в составе координатора имеется РЛС сопровождения УО. Аппаратура координатора в любой системе РУ по радиолучу размещается на ПУ и УО. Радиоаппаратура УО является довольно простой, так как содержит лишь приемник и преобразователи его выходных сигналов.

11.1.5. Принцип действия систем командного управления

Системы командного управления (КУ) характеризуются тем, что команды наведения формируются на ПУ. Различают системы командного управления первого вида КУ-1 и второго вида КУ-2. В системах КУ-1 используются трехточечные методы наведения, при этом измерители координат цели и УО размещаются на ПУ.

Эти системы могут быть автоматическими и полуавтоматическими. В полуавтоматических системах в формировании $\Delta(t)$ принимает участие оператор. Команды наведения передаются на УО с помощью КРУ. Системы КУ-1 могут использоваться для управления беспилотными самолетами, ЗУР, ракетами «воздух — поверхность» и др. Достоинствами таких ракет являются сравнительная простота и малые габариты радиоаппаратуры УО. Однако их точность убывает с увеличением дальности.

В системах КУ-2 используются двухточечные методы. В этих системах измерители координат и параметров движения цели располагаются на УО, откуда они транслируются на ПУ для формирования $\Delta(t)$. В измерении параметра $\Delta(t)$ принимает участие оператор. Команды управления с ПУ передаются на УО с помощью командной радиолинии управления КРУ.

Структурная схема системы КУ первого вида изображена на рис. 11.6, а. Входными воздействиями координатора являются координаты и параметры движения линий ПУ — цель и ПУ — УО, которые формируются кинематическими звеньями КЗ-1 и КЗ-2. Если ПУ является подвижным, на работу измерителей координатора также влияют параметры движения ПУ. В автоматических системах выходные сигналы координатора преобразуются УФК и пере-

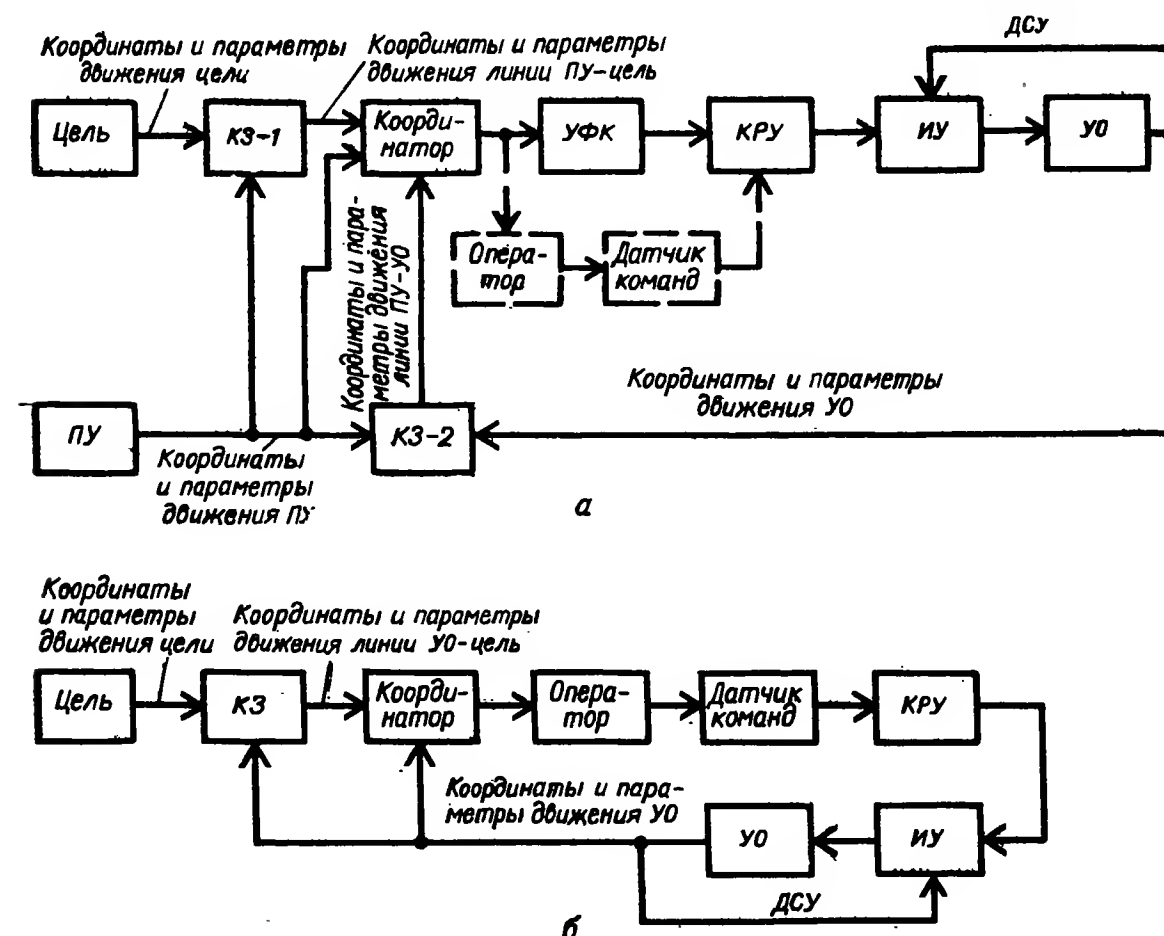


Рис. 11.6. Структурная схема системы командного управления (КУ): первого вида (а); второго вида (б)

даются на УО с помощью КРУ. В полуавтоматических системах измеренные значения $\Delta(t)$ вырабатываются оператором. При необходимости корректировки движения УО оператор воздействует на датчик команд, связанный с передающей частью КРУ. В некоторых полуавтоматических системах $\Delta(t)$ вырабатывается вычислителем, однако некоторые данные в него вводятся оператором.

Радиосигналы, принимаемые приемной частью КРУ УО, преобразуются в напряжения (токи), под действием которых производится изменение движения УО. Обычно требуется управлять одновременно несколькими УО. Поэтому КРУ, как правило, является многоканальной.

Структурная схема системы КУ второго вида изображена на рис. 11.6, б. Входными воздействиями координатора являются координаты и параметры движения линии УО — цель, формируемые КЗ. Выходные сигналы координатора транслируются на ПУ. Команды управления вырабатываются оператором и передаются на УО с помощью КРУ. Системы КУ второго вида обладают более высокой точностью, однако имеют более сложную аппаратуру на УО.

11.1.6. Принцип действия автономных систем радиуправления

Автономные программные системы РУ используются для наведения УО на неподвижные и малоподвижные цели, координаты которых известны до старта. В основе построения автономных систем управления лежит принцип измерения параметров движения УО и сравнения их с программными значениями. Координаторы таких систем содержат нерадиотехнические и радиотехнические измерители. Среди радиотехнических автономных систем РУ наиболее известными являются системы, основанные на использовании доплеровских измерителей путевой скорости и угла сноса (ДИСС), системы РУ по земным радиоориентирам, радиолокационные системы профильного полета, радионерционные системы и др.

Типовая структурная схема автономной системы РУ приведена на рис. 11.7. Сведения о заданном режиме полета УО вводятся в вычислитель. Кинематическое звено (КЗ) связывает угловые перемещения УО с движением его центра масс. Параметры, характери-

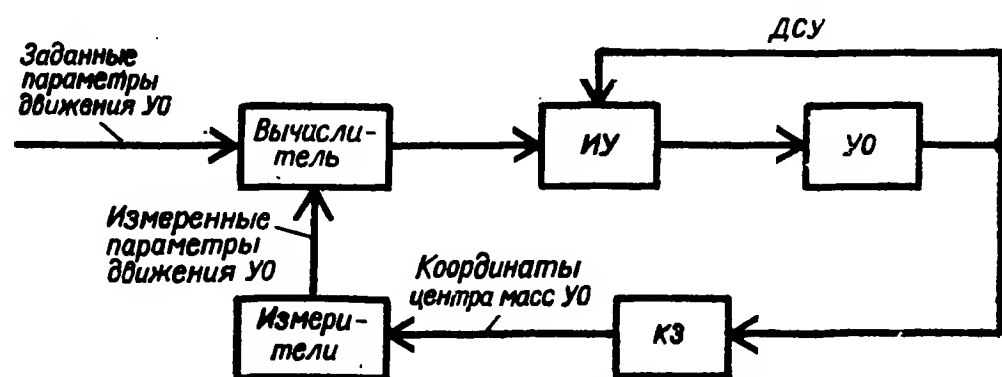


Рис. 11.7. Структурная схема автономной системы радиуправления

зующие текущий режим движения УО, определяются измерителем координат. С помощью вычислителя измеренные координаты сравниваются с программными значениями. На основе сравнения формируются управляющие сигналы, под действием которых корректируется движение УО так, что текущее значение параметров оказывается в пределах программных значений. Автономные системы РУ используются для наведения самолетов и ракет.

В комбинированных системах РУ применяются как автономные, так и неавтономные подсистемы. В состав координаторов таких систем входят системы самонаведения, включающиеся в работу на конечном участке движения УО. Такие системы РУ обладают большой дальностью, высокой точностью и помехозащищенностью, однако являются более сложными. Комбинированные системы РУ используются для наведения самолетов и УР.

11.1.7. Координаторы самонаводящихся ракет

В системах самонаведения параметр $\Delta(t)$ измеряется на УО по сигналам, поступающим от цели. В этих системах используются двухточечные методы наведения. Роль координатора системы РУ выполняет ГСН. При наведении УО на быстро перемещающиеся цели используется метод пропорционального наведения. При наведении УО на неподвижные и малоподвижные цели могут использоваться методы прямого наведения и погони.

При пропорциональном методе наведения в состав координатора включаются измерители скорости сближения УО с целью, нормального ускорения и угловой скорости линии визирования. Нормальные ускорения, развиваемые УО, измеряются акселерометрами. Определение угловой скорости линии визирования и относительной скорости сближения УО с целью обеспечивается системами АСН и АСС (АСД). В пассивных системах самонаведения скорость сближения не измеряется, а вводится в вычислитель приближенно перед пуском УО.

С помощью ГСН осуществляется: поиск, обнаружение и захват цели на автосопровождение; селекция сигнала цели на фоне сигналов других целей и помех; формирование сигналов рассогласования для каналов курса и тангажа; обнаружение помех, анализ их структуры, включение устройств помехозащиты или перевод ГСН в режим пассивного наведения на источник помех; формирование дистанционных команд в зависимости от дальности до цели.

В зависимости от диапазона используемых ЭМВ различают радиотехнические (радиолокационные) РГС, тепловые (инфракрасные) ТГС, лазерные ЛГС и телевизионные ТВГС головки самонаведения. РГС могут быть активными, полуактивными и пассивными, ЛГС — активными и полуактивными, а тепловые ТГС и телевизионные ТВГС — всегда пассивными. Возможно также построение комбинированных (активно-пассивных, полуактивно-пассивных и полуактивно-активных) ГСН. Состав и структура функциональной схемы ГСН ракеты зависит от типа системы самонаведения, а

также от вида сигнала подсвета цели. Рассмотрим принцип действия основных ГСН ракет.

Принцип действия активной импульсной РГС. В активной ГСН передатчик, облучающий цель, и приемник сигналов, отраженных от цели, находятся на ракете. Структурная схема активной импульсной РГС приведена на рис. 11.8. РГС состоит из

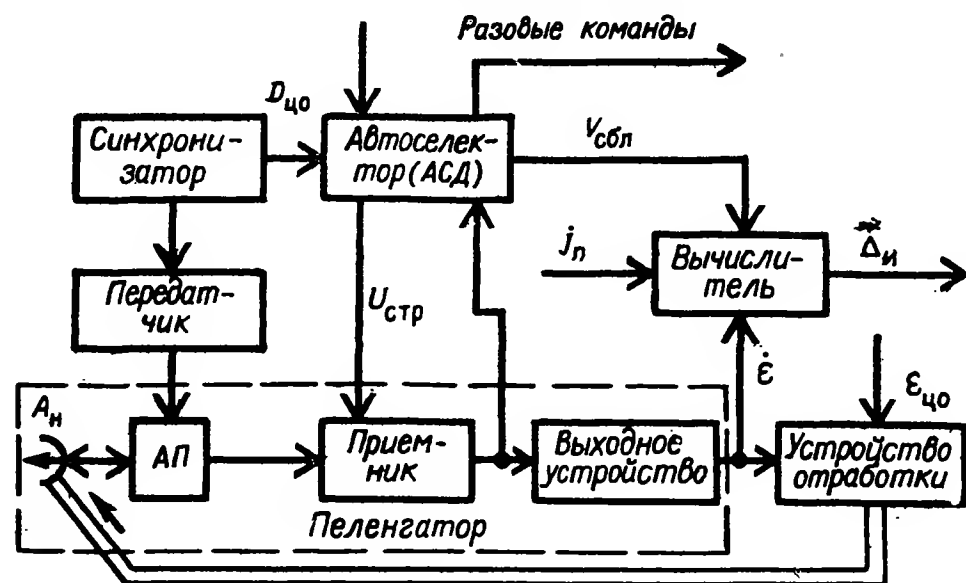


Рис. 11.8. Структурная схема активной импульсной РГС

автономной импульсной РЛС, работающей в режиме слежения за целью, и вычислителя. Передатчик РЛС связан через антенный переключатель (АП) с антенной. Запуск передатчика осуществляется импульсами синхронизатора. Отраженные от цели сигналы преобразуются и усиливаются в приемнике пеленгатора РЛС. Элементами пеленгатора являются антенна, приемник и выходное устройство. Совокупность пеленгатора и устройства обработки образует систему АСН. В пеленгаторах РГС используется разностный метод пеленгации целей. Сигнал рассогласования на выходе пеленгатора представляет собой медленно изменяющееся напряжение, пропорциональное в некоторых пределах угловому отклонению цели относительно РСН. Под действием усиленного по мощности сигнала рассогласования привод (устройство обработки) поворачивает антенну относительно корпуса ракеты так, что РСН «следит» за целью. Вычислитель вырабатывает измеренные значения параметра рассогласования $\Delta_{\text{и}}$.

В активных импульсных ГСН основная селекция цели осуществляется в автоселекторе по дальности. Автоселектор обычно выполняется в виде автодальномера (системы АСД). Нормальное ускорение, развиваемое ракетой, измеряется акселерометром и вводится в параметр рассогласования при пропорциональном методе наведения.

Обнаружитель сигнала цели переводит координатор в режим автосопровождения цели (АСЦ). Этапу обнаружения (захвата)

предшествует, как правило, процесс поиска цели. Для облегчения поиска и захвата цели используются команды целеуказания по угловым координатам $\epsilon_{ц0}$ и дальности $D_{ц0}$. По командам $\epsilon_{ц0}$ ось антенны устанавливается в направлении на цель. С помощью команд целеуказания $D_{ц0}$ осуществляется смещение следящих импульсов (стробов) по времени. Команды целеуказания $\epsilon_{ц0}$ и $D_{ц0}$ вырабатываются РЛС ПУ. Включение РГС на автосопровождение цели производится при заданном превышении полезного сигнала уровня собственных шумов приемника. Наиболее простой обнаружитель состоит из накопителя импульсов и порогового устройства (реле).

В РГС имеется обнаружитель помех, предназначенный для обнаружения и анализа структуры принимаемого помехового сигнала. В простейших обнаружителях импульсных РГС для выделения помехи используют принцип временной селекции. Обнаружитель помех в простейшем случае также представляет собой накопитель и пороговое устройство, срабатывающее при определенной интенсивности помех.

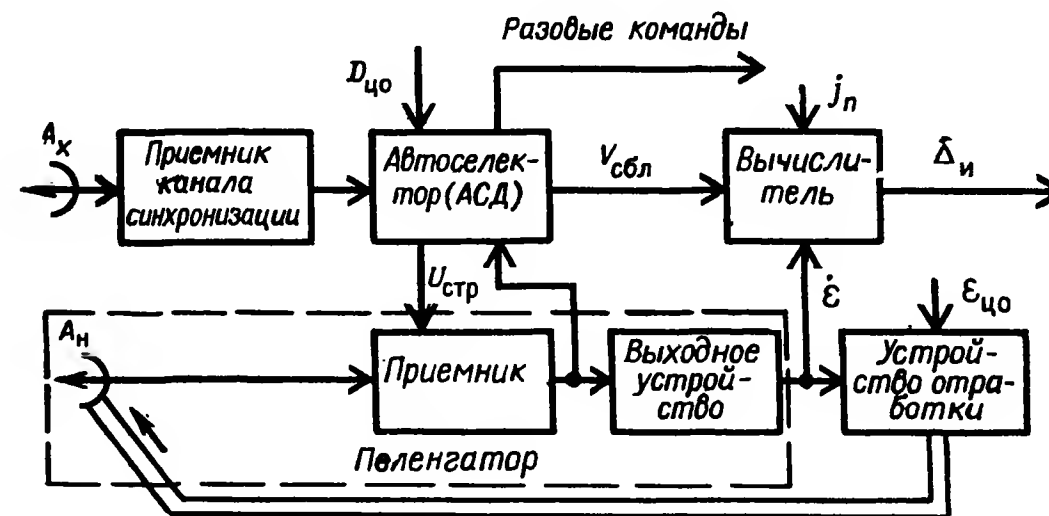


Рис. 11.9. Структурная схема полуактивной импульсной РГС

Принцип действия полуактивной импульсной РГС. Полуактивная импульсная РГС отличается от активной тем, что передатчик станции подсвета цели (СПЦ) располагается на ПУ. Структурная схема полуактивной импульсной РГС изображена на рис. 11.9. Сравнение этой схемы с предыдущей показывает, что они содержат много общих элементов. Основное отличие состоит в том, что вместо синхронизатора, передатчика, АП, входящих в состав активной РГС, полуактивная ГСН содержит канал синхронизации (опорный канал). Этот канал предназначен для приема прямых сигналов СПЦ. Он включает в свой состав хвостовую антенну A_x и приемник, выходные сигналы которого используются для синхронизации автоселектора и для блокировки приемника пеленгатора на время приема сигналов СПЦ. Благодаря такой блокировке исключается возможность приема сигналов СПЦ, проникающих по боковым лепесткам ДНА.

Принцип действия полуактивной РГС с НИ и КНИ. Структурная схема полуактивной РГС с НИ представлена на рис. 11.10.

В таких РГС основная селекция сигналов цели осуществляется по скорости сближения ракеты с целью $V_{сбл}$ (частота Доплера F_d). Выделение сигналов с частотой F_d производится при сравнении отраженного от цели сигнала, принятого приемником пеленгатора, с прямым сигналом СПЦ, поступающим с выхода приемника канала синхронизации. В автоселекторе (системе АСС) имеется узкополосный следящий фильтр, пропускающий лишь сигнал, F_d которого

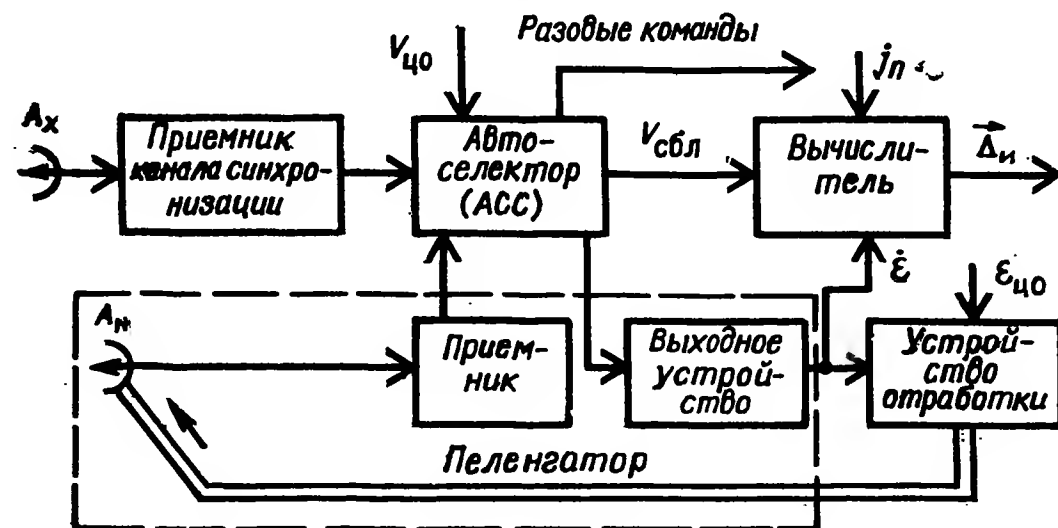


Рис. 11.10. Структурная схема полуактивной РГС с непрерывным излучением

пропорциональна $V_{сбл}$ ракеты с выбранной целью. Этот сигнал, содержащий также информацию об угловом положении цели, проходит в выходное устройство пеленгатора и далее на устройство обработки. Рассматриваемый автоселектор автоматически измеряет частоту F_d , а следовательно, и скорость сближения $V_{сбл}$. Остальные элементы схемы имеют то же назначение, что и в предыдущих схемах. Назначение сигналов $\epsilon_{ц0}$ такое же, как в схеме (рис. 11.9). Система АСС получает целеуказание по скорости сближения $V_{ц0}$. Радиочастотный тракт полуактивной РГС с НИ строится по схеме, изображенной на рис. 11.11. Отраженный от цели сигнал улавливается носовой антенной A_n пеленгатора, а сигнал СПЦ — антенной A_x канала синхронизации. После преобразования и усиления принятых сигналов по частоте $f_{пр}$ сигналы с выходов УПЧ подаются на смеситель $См3$, который осуществляет операцию перемножения поданных на него сигналов. Результат перемножения фильтруется фильтром доплеровских частот (ФДЧ). В результате на выходе ФДЧ выделяется сигнал разностной частоты, обусловленной взаимным перемещением цели, ракеты и РЛС (СПЦ). РЛС с НИ может использовать немодулированные колебания или ЧМ-колебания.

Принцип действия полуактивных РГС при использовании немодулированных сигналов подсвета цели не отличается от принципа действия РЛС с НИ, рассмотренного в гл. 6. Различие состоит лишь

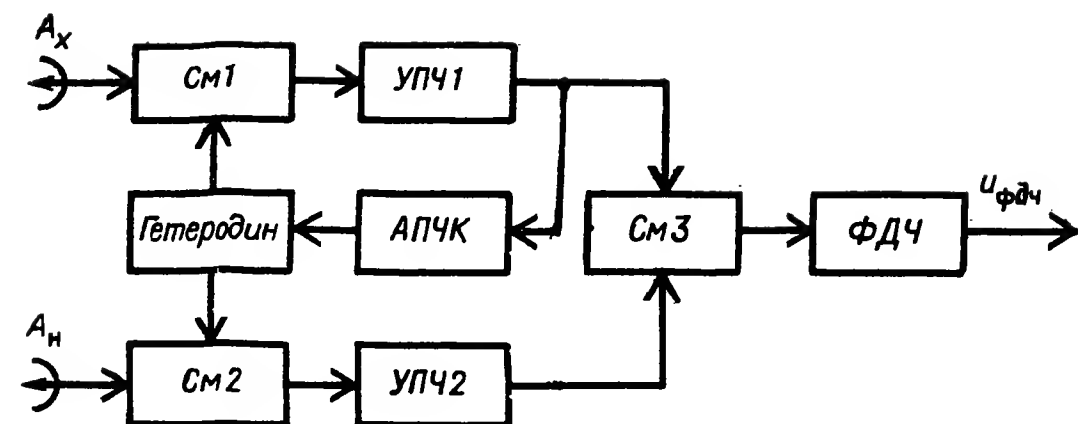


Рис. 11.11. Радиочастотный тракт полуактивной РГС с непрерывным излучением

в том, что в РЛС опорным сигналом является сигнал передатчика, а в полуактивной РГС — сигнал, принятый приемником канала синхронизации. Как известно из гл. 6, напряжение на выходе ФДЧ РГС описывается выражением

$$u_{фдч} = U_{фдч}(t) \cos \Omega_d t,$$

где $U_{фдч}(t) = U_{фдч}[1 + m \cos(\Omega_{ек} t - \varphi_c)]$ — огибающая сигнала, содержащая информацию об отклонении цели от РСН пеленгатора РГС с коническим сканированием ДНА; $\Omega_d = 2\pi F_d$ — доплеровская частота. Если угол упреждения мал,

$$F_d = \frac{2V_{сбл}}{\lambda} = \frac{2(V_p \pm V_{ц})}{\lambda}. \quad (11.11)$$

В этом выражении знак «плюс» соответствует случаю атаки цели на встречных курсах, а знак «минус» — на догонных курсах. При других значениях углов величина частоты заключена в интервале частот

$$\frac{2(V_p - V_{ц})}{\lambda} \leq F_d \leq \frac{2(V_p + V_{ц})}{\lambda}.$$

АЧХ фильтра ФДЧ должна обеспечивать неискаженное прохождение сигнала в диапазоне возможных частот F_d . Примерный вид такой характеристики изображен на рис. 11.12. Частота $F_{дз}$ соответствует сигналу, отраженному от условной неподвижной точки Земли. При атаках на догонных курсах F_d будет располагаться сле-

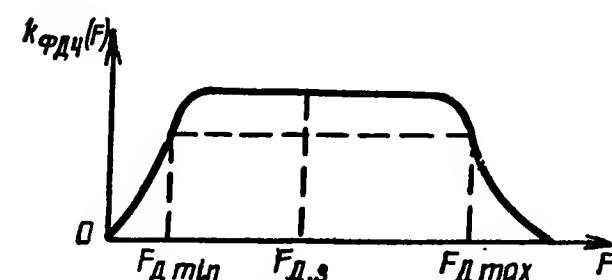


Рис. 11.12. Амплитудно-частотная характеристика фильтра доплеровских частот

ва от $F_{дз}$, а при атаках на встречно-пересекающихся курсах — справа от нее. В районе $F_{дз}$ наблюдаются мощные сигналы, отраженные от Земли. Информация о скорости $V_{сбл}$ содержится в частоте $F_{д}$ и используется в системе АСС.

Отселектированный узкополосным фильтром системы АСС сигнал, отраженный от цели, поступает на систему АСН, которая реагирует на изменения амплитуды (огibaющей) входного сигнала. В режиме автосопровождения РГС осуществляет непрерывное слежение за целью по скорости сближения и направлению. Однако в РГС с немодулированным сигналом подсвета цели невозможно определить дальность до цели, поэтому возможен захват на автосопровождение целей, находящихся вне зоны досягаемости ракеты.

Для устранения этого недостатка в СПЦ используются частотно-модулированные непрерывные колебания, например, вида

$$u_{изл} = U_{изл} \cos(\omega_0 t + \beta \sin \Omega t), \quad (11.12)$$

где $\beta \gg 1$ — индекс модуляции; Ω — частота «дальномерной» модуляции.

Напряжение сигнала на выходе ФДЧ без учета постоянной фазы

$$u_{фдч} = U_{фдч}(t) \cos \left[\Omega_d t - 2\beta \sin \frac{\Omega \tau_3}{2} \cos(\Omega t - \varphi_1) \right], \quad (11.13)$$

где τ_3 — время запаздывания приходящего от цели сигнала по отношению к опорному сигналу, принятому приемником канала синхронизации.

При малых углах сближения

$$\tau_3 \approx \frac{D_{ц} + D_{рц} - D_p}{c} = \frac{2(D_{ц} - D_p)}{c} = \frac{2D_{рц}}{c}$$

и пропорционально $D_{рц}$. При этом фаза φ_1 определяется соотношением $\varphi_1 = \frac{D_{ц}}{c} \Omega$.

Если угол упреждения мал, то Ω_d пропорциональна скорости сближения, φ_1 — дальности УО — цели. Сигнал $u_{фдч}$ поступает на вход смесителя СМ-4 системы АСС (рис. 6.35). На другой его вход поступает сигнал перестраиваемого генератора. На выходе смесителя формируется напряжение разностной частоты. Если перестраиваемый генератор вырабатывает сигнал с частотой ω_r , то сигнал на выходе смесителя определяется выражением

$$u_4 = k_1 U_{фдч}(t) \cos \left[\omega_r t - 2\beta \sin \frac{\Omega \tau_3}{2} \cos(\Omega t - \varphi_1) \right],$$

где k_1 — коэффициент передачи смесителя; $\omega_r = \omega_r - \Omega_d$ — разностная частота.

После смесителя устанавливается узкополосный фильтр — УФ (строб скорости), его роль выполняет УПЧ, настроенный на частоту $\omega_{пр}$. Этот усилитель является основным селектирующим элементом схемы. Его полоса пропускания определяет полосу пропускания

приемного устройства и характеризует разрешающую способность системы самонаведения по скорости δV_p :

$$\delta V_p = 0,5 \lambda \Delta f_{\phi}.$$

Практически Δf_{ϕ} составляет величину $200 \text{ Гц} \leq \Delta f_{\phi} \leq 1000 \text{ Гц}$.

Отселектированный сигнал с выхода УФ поступает к выходным каскадам пеленгатора, где формируется управляющее напряжение привода антенны, а также на схему частотной перестройки генератора. Это необходимо потому, что в процессе самонаведения частота Ω_d изменяется, поэтому для удержания частоты ω_r вблизи настройки узкополосного фильтра $\omega_{пр}$ следует изменять частоту гетеродина ω_r . Для этого сигнал с выхода фильтра поступает на ограничитель и далее на ЧД. Ограничитель устраняет амплитудную модуляцию сигнала и тем самым исключает влияние этой модуляции на точность измерения скорости сближения и дальности ракета — цель. Если считать, что УФ производит лишь усиление напряжения, а частота сигнала ω_r не выходит за пределы линейного участка дискриминационной характеристики ЧД, то на его выходе образуется напряжение

$$u_{чд} = k_{чд}(\omega_{пр} - \omega_r) - 2k_{чд} \Omega \beta \sin \frac{\Omega \tau_3}{2} \sin(\Omega t - \varphi_1), \quad (11.14)$$

где $k_{чд}$ — коэффициент передачи ЧД.

Слагаемые выражения (11.14) разделяются, причем медленно изменяющееся напряжение $u_{\omega} = k_{чд}(\omega_{пр} - \omega_r) = k_{чд} \Delta \omega_r$ используется для настройки перестраиваемого генератора. В режиме точного слежения частота генератора с точностью до постоянного слагаемого повторяет закон изменения частоты Ω_d , т. е.

$$\omega_r = \Omega_d + \omega_{пр}.$$

Второе слагаемое представляет собой гармонический сигнал с частотой Ω , амплитуда которого несет информацию о дальности ракета — цель. После разделения сигнал с частотой Ω подается на АД, на выходе которого выделяется напряжение

$$u_{\tau} = 2k_{чд} k_{ад} \Omega \beta \sin \frac{\Omega \tau_3}{2}, \quad (11.15)$$

где $k_{ад}$ — коэффициент передачи АД.

Зависимость $u_{\tau} = \eta(D_{рц})$ приведена на рис. 11.13. При малых значениях $D_{рц}$ она является линейной. Напряжение u_{τ} подается на

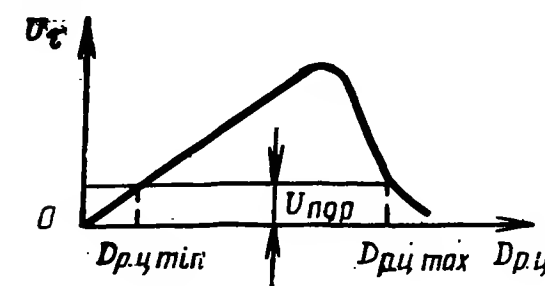


Рис. 11.13. Зависимость напряжения на выходе амплитудного детектора от дальности до цели

пороговое устройство, срабатывающее при $u_t \geq U_{\text{пор}}$, где $U_{\text{пор}}$ — пороговое напряжение. Его величина выбирается так, чтобы захват обеспечивался лишь целей, удаленных от УО на расстояние $D_{\text{рц min}} \leq D_{\text{рц}} \leq D_{\text{рц max}}$. Для исключения сброса захвата при $D_{\text{рц}} \leq D_{\text{рц min}}$ используются цепи блокировки.

В полуактивных РГС с КНИ используются импульсные сигналы с ВЧПИ. Селекция цели в таких РГС осуществляется по скорости сближения (частоте Доплера). Однозначное измерение доплеровской частоты осуществляется при выполнении условия $F_{\text{д}} \geq 2F_{\text{д max}}$, что практически всегда обеспечивается. При измерении дальности применяется импульсный метод. Для исключения неоднозначности при измерении дальности используются модуляция периода следования импульсов и логическая обработка принятых от цели сигналов.

В системах самонаведения с НИ и КНИ обнаружение широкополосной помехи происходит на основе частотной селекции. В этом случае наличие помех и их интенсивность определяются устройством, состоящим из полосового фильтра, настроенного на частоту $F_{\text{пф}} > F_{\text{д max}}$, АД, накопителя и порогового устройства. Сигнал, образуемый на выходе полосового фильтра при появлении помех, воздействует на АД и накапливается. При превышении определенного уровня срабатывает пороговое устройство, которое переводит РГС в пассивный режим (сопровождения источника помех). При срабатывании обнаружителя управляемый генератор отключается от схемы перестройки его частоты. Благодаря этому фиксируется измеренное значение скорости сближения УО — цель.

11.2. Радиоэлектронные средства зенитных ракетных комплексов

11.2.1. Радиоэлектронные средства ЗРК «Найк-Геркулес»

а) Основные ТТД ЗРК. Состав, характеристика РЭС ЗРК. В системах ПВО капиталистических государств наиболее распространенным наземным ЗРК большой дальности является «Найк-Геркулес» (США). Основные ТТД ЗРК: нижняя граница зоны поражения на дальностях 1,1 км — 1200 м, 20 км — 1500 м, 75 км — 3000 м; верхняя граница зоны поражения на дальностях 140 км — 25 000 м, 95 км — 30 000 м; максимальная дальность стрельбы — 140 км; эффективная дальность стрельбы — 65 км; средняя продолжительность цикла стрельбы — 2 мин; радиус поражения обычной боевой частью — 35 м; максимальная скорость ракеты — 1150 м/с; ЗУР поражает цели, летящие со скоростями не более 775 м/с; число одновременно обстреливаемых батареями целей — 1.

ЗУР имеет командную систему управления с отдельным радиолокационным слежением за целью и ракетой. Ракета — двухступенчатая, снабжена стартовым и маршевым двигателями, имеет нор-

мальную аэродинамическую схему. Боевая часть ракеты — осколочно-фугасная массой 500 кг для поражения одиночной цели либо ядерная для поражения групповых целей.

В состав батареи ЗРК «Найк-Геркулес» входят следующие РЭС: две РЛС целеуказания, РЛС слежения за целью, РЛС слежения за ракетой, автономный радиолокационный дальномер, вычислитель (счетно-решающий прибор СРП), бортовая аппаратура ЗУР.

Основные ТТД РЭС ЗРК «Найк-Геркулес» приведены в табл. 11.1.

Таблица 11.1

Основные ТТД РЭС ЗРК «Найк-Геркулес»

Тип РЛС	Назначение	Вид излучения	λ , см	P_n , кВт	τ_n , мкс	F_n , Гц	$\alpha_{0,5}^\circ$	$\gamma_{0,5}^\circ$
AN/MSW-1	Целеуказание	Импульсное	10	1000	1,3	500	1,5	5,5
AN/MPQ-43	»	»	22	1000	3	300	1,3	5
AN/MPA-4A	Слежение за целью	»	3	250	0,25	500	0,7	0,7
AN/MPA-4B	Слежение за ракетой	»	3	125	0,25	500	0,7	0,7
AN/MPQ-37	Автономный дальномер	»	1,8	100	0,6	1600	1,2	1,2

РЛС целеуказания предназначены для обнаружения и опознавания воздушных целей, определения их координат и параметров движения. РЛС работают в импульсном режиме. РЛС AN/MSW-1 работают в диапазоне 10 см, а AN/MPQ-43 — в диапазоне 22 см. Для защиты РЛС от активных помех применяется перестройка частоты, для защиты от пассивных помех — схемы селекции движущихся целей (СДЦ).

РЛС слежения за целью AN/MPA-4A предназначена для сопровождения цели и определения ее текущих координат. Данные РЛС используются в СРП для выработки команд управления ракетой. Станция работает в импульсном режиме в диапазоне 3 см, имеет узкую ДНА ($\phi_{0,5} = 0,7^\circ$). Для пеленгации цели используется моноимпульсный метод. Для защиты от активных помех используются перестройка по частоте и моноимпульсный режим работы.

РЛС слежения за ракетой AN/MPA-4B предназначена для определения ее координат и передачи на борт ракеты команд управления. Данные о ракете используются в СРП при выработке команд управления ракетой. РЛС работает в импульсном режиме в диапазоне 3 см, использует моноимпульсный метод пеленгации. В обеих РЛС слежения используются импульсные сигналы с малой

длительностью ($\tau_{\text{и}}=0,25$ мкс). Селекция цели в РЛС осуществляется по дальности (система АСД). Отличие РЛС слежения за ракетой от РЛС слежения за целью состоит в том, что передатчик РЛС слежения за ракетой излучает пачки радиоимпульсов, в которых методом ФИМ закодирована информация о командах управления полетом ЗУР. Кроме того, РЛС слежения за ракетой использует не метод отраженного сигнала, а метод ретрансляции сигналов, что увеличивает дальность действия РЛС при обнаружении своих ракет.

Автономный радиолокационный дальномер служит для измерения дальности до цели в условиях активных помех, работает в импульсном режиме в диапазоне 1,8 см, селекция цели осуществляется по дальности (система АСД). Антенна дальномера с помощью линии синхронной связи связана с антенной РЛС слежения за целью.

Бортовая аппаратура ракеты состоит из приемника команд управления, дешифратора, ответчика, антенн и автопилота, работает в диапазоне 3 см.

б) Принцип функционирования системы управления огнем. ЗРК «Найк-Геркулес» состоит из трех огневых секций с четырьмя ПУ в каждой из них. На ПУ находится одна ракета. Система управления позволяет наводить на цель в каждый момент времени одну ракету. В ЗРК используется командная система управления с раздельным радиолокационным слежением за целью и ракетой. Команды управления ракетой вырабатываются на ПУ с помощью СРП. Для наведения ракеты применяются трехточечные методы наведения (метод параллельного сближения, а в условиях помех — метод совмещения).

Состав и взаимодействие аппаратуры управления огнем батареи показаны на рис. 11.14.

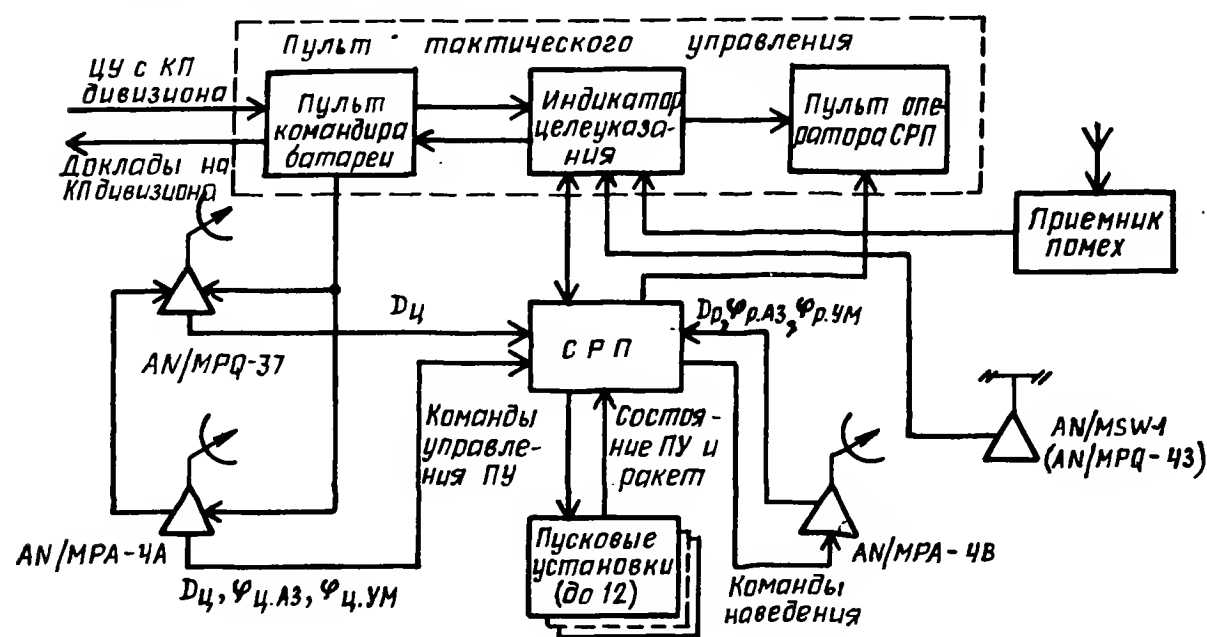


Рис. 11.14. Состав и взаимодействие аппаратуры управления огнем батареи «Найк-Геркулес»

Управление боевой работой батареи осуществляет офицер тактического управления со своего пульта. На пульте управления отображаются воздушная обстановка, помеховая обстановка, команды целеуказания с КП дивизиона, информация о состоянии ракет на ПУ. Офицер тактического управления, получив по сети оповещения ПВО целеуказание, дает команду оператору РЛС целеуказания обнаружить и опознать цель. После этого по команде офицера тактического управления оператор накладывает на отметку выбранной для поражения цели специальный маркер. В результате на РЛС слежения за целью подается целеуказание по азимуту и дальности.

По данным целеуказания осуществляется захват на автоматическое сопровождение цели РЛС АН/МРА-4А. После этого СРП начинает вычислять координаты упреждений точки встречи ракеты с целью. Если дальность до упрежденной точки оказывается в пределах разрешенной, офицер тактического управления производит пуск ракеты. Предварительно он выбирает тип боевой части ракеты (ядерной или обычной). По данным СРП производится автоматический поворот антенны РЛС слежения за ракетой и ПУ в направлении упрежденной точки встречи ракеты с целью. После пуска ракеты РЛС слежения за ракетой осуществляет захват и автосопровождение последней. Для повышения точности и увеличения дальности используется радиолокационный ответчик, установленный на ракете.

Измеренные значения координат ракеты вводятся в СРП. Здесь на основании этих данных производится вычисление команд управления ракетой. Эти команды кодируются и передаются на ракету с помощью РЛС АН/МРА-4В, которая выполняет роль передатчика КРУ. Подрыв боевой части ракеты производится по командам с ПУ. Момент подрыва определяется СРП. Для передачи этой команды используется РЛС слежения за ракетой. В модернизированных ЗУР подрыв боевой части может осуществляться также радиовзрывателем.

В случае создания активных помех с цели РЛС АН/МРА-4А измеряет только угловые координаты. Для измерения дальности в этом случае используется автономный дальномер АН/МРQ-37. Его антенна вращается синхронно с антенной РЛС слежения за целью. Если канал измерения дальности не подавлен, ракета по-прежнему наводится в упрежденную точку встречи. При подавлении РЛС и дальномера помехами используется упрощенный метод наведения (метод совмещения), который дает более низкую точность. Кроме того, РЛС слежения за целью и ракетой имеют также режим ручного (полуавтоматического) сопровождения цели, который позволяет уменьшить влияние различных помех.

При отсутствии целеуказания с КП дивизиона решение на обстрел целей принимает командир батареи. Для этого используются данные, получаемые с помощью РЛС целеуказания, установленных на позиции батареи.

11.2.2. Радиоэлектронные средства ЗРК «Хок»

а) Основные ТТД ЗРК «Хок». Состав и характеристика РЭС ЗРК. Наиболее распространенным наземным ЗРК средней дальности стран НАТО является модернизированный комплекс «Хок» («Усовершенствованный Хок»), предназначенный для поражения одиночных и групповых целей, летящих на малых и средних высотах. Основные ТТД ЗРК «Хок»: максимальная дальность обнаружения цели с эффективной площадью рассеяния $\sigma_{\text{ц}} = 3 \text{ м}^2$ на высоте 3000 м — 110 км; максимальная дальность стрельбы — 42 км; эффективная дальность стрельбы — 31 км; нижняя граница зоны поражения — 10 м; верхняя граница зоны поражения — 20 км; время переноса огня на другую цель — 20 с; число одновременно обстреливаемых целей огневой секцией — 1; максимальная скорость ракеты — 900 м/с; ЗУР поражает цели, летящие со скоростью не более 600 м/с; боевая часть — обычная с массой 73 кг или ядерная; система радиоперехвата — полуактивная радиолокационная с непрерывным излучением; рубеж целеуказания на больших высотах — 110 км; рубеж целеуказания на малых высотах — 73 км.

Батарея состоит из командного пункта и двух (в самоходном варианте — из трех) огневых секций, имеющих по три ПУ. На каждой ПУ находятся три ракеты.

В состав батареи входят следующие РЭС: РЛС целеуказания больших и средних высот, две-три РЛС целеуказания малых высот, две (в подвижном варианте — три) РЛС подсвета (облучения) цели, автономный радиолокационный дальномер.

В состав системы управления кроме РЛС подсвета цели входят полуактивные РГС с непрерывным излучением. РЛС целеуказания снабжены радиолокационными системами опознавания цели. Основные ТТД РЭС ЗРК «Хок» приведены в табл. 11.2.

Таблица 11.2

Основные ТТД РЭС ЗРК «Хок»

Тип РЛС	Назначение	Вид излучения	λ , см	$P_{\text{н}}, P_{\text{ср}}$, кВт	$\tau_{\text{н}}$, мкс	$F_{\text{н}}$, Гц	$\alpha_{0,5}^{\text{вз}}$	$\gamma_{0,5}^{\text{ум}}$
AN/MPQ-48	Обнаружение низколетящих целей	Непрерывное	3	0,2	—	—	0,8	2,8
AN/MPQ-50	Обнаружение целей	Импульсное	23	500	3	667	1,8	45
AN/MPQ-46	Облучение цели	Непрерывное	3	1,2	—	—	1,8	1,8
AN/MPQ-51	Дальномер	Импульсное	1,8	100	0,6	1000	0,7	0,7

РЛС целеуказания AN/MPQ-50 предназначена для обнаружения и опознавания целей на больших и средних высотах. Работает в импульсном режиме в диапазоне 23 см. Для борьбы с помехами в РЛС используются перестройка частоты, селекция движущихся целей и изменение частоты следования импульсов. РЛС целеуказания AN/MPQ-48 предназначена для обнаружения и опознавания целей на малых высотах. Работает в режиме непрерывного излучения с ЧМ в диапазоне 3 см. Станция имеет две антенны — передающую и приемную. Для борьбы с помехами используется перестройка частоты.

РЛС облучения цели AN/MPQ-46 работает в диапазоне волн $\lambda = 3 \text{ см}$ в режиме непрерывного излучения. Наличие двух (трех) РЛС позволяет батарее вести огонь одновременно по двум (трем) целям. РЛС имеет две антенны, расположенные рядом на одном основании. Передающая антенна устроена так, что кроме основной (узкой) ДНА она формирует широкую ДНА для передачи на ракету опорного сигнала. Для измерения дальности используется метод ЧМ, для измерения угловых координат — разностный метод (метод конического сканирования). Для защиты от помех используется перестройка частоты. Селекция движущейся цели осуществляется по скорости (системой АСС).

Автономный дальномер AN/MPQ-51 предназначен для определения дальности до цели при подавлении канала измерения дальности РЛС облучения цели. Работает в импульсном режиме в диапазоне 1,8 см. Антенна дальномера с помощью линии синхронной связи связана с антенной РЛС подсвета цели. В дальномере селекция цели осуществляется по дальности.

Полуактивная РГС ракеты «Хок» имеет следующие ТТД: диапазон волн — 3 см; вид излучения — непрерывный; дальность захвата — 76 км; ширина ДНА в обеих плоскостях — 6° ; метод пеленгации цели — разностный (метод конического сканирования); селекция цели осуществляется по скорости.

При наведении ракеты на цель используется двухточечный метод пропорционального сближения. Команды наведения вырабатываются на ракете. Подрыв ракеты осуществляется полуактивным радиовзрывателем, использующим сигналы СПЦ.

б) Принцип функционирования системы управления огнем ЗРК «Хок». Управление огнем батареи ЗРК «Хок» осуществляется с пульта управления. Состав и взаимодействие аппаратуры управления батареи ЗРК «Хок» показаны на рис. 11.15. На пульте управления отображаются воздушная обстановка в районе батареи, команды целеуказания и состояние ракет на ПУ.

После получения команды целеуказания с КП дивизиона офицер тактического управления дает указание операторам РЛС целеуказания AN/MPQ-48, AN/MPQ-50 обнаружить цель. После уточнения ее координат и опознавания он назначает одну из огневых секций для обстрела и дает указание операторам соответствующих РЛС облучения цели захватить цель на автосопровождение. При

этом антенна указанной РЛС ориентируется в направлении на цель. После обнаружения и захвата цели на автосопровождение оператор РЛС облучения дает целеуказание на ПУ. Последние ориентируются в направлении упрежденной точки встречи. Антенны РГС ракет на этих ПУ ориентируются в направлении на цель.

После отработки команд целеуказания аппаратура РГС начинает поиск сигнала по частоте Доплера. Поиск построен так, что обеспечивает захват цели, имеющий наибольшую скорость сближения. В режиме автосопровождения РГС измеряет угловые координаты, радиальную скорость и дальность до цели.

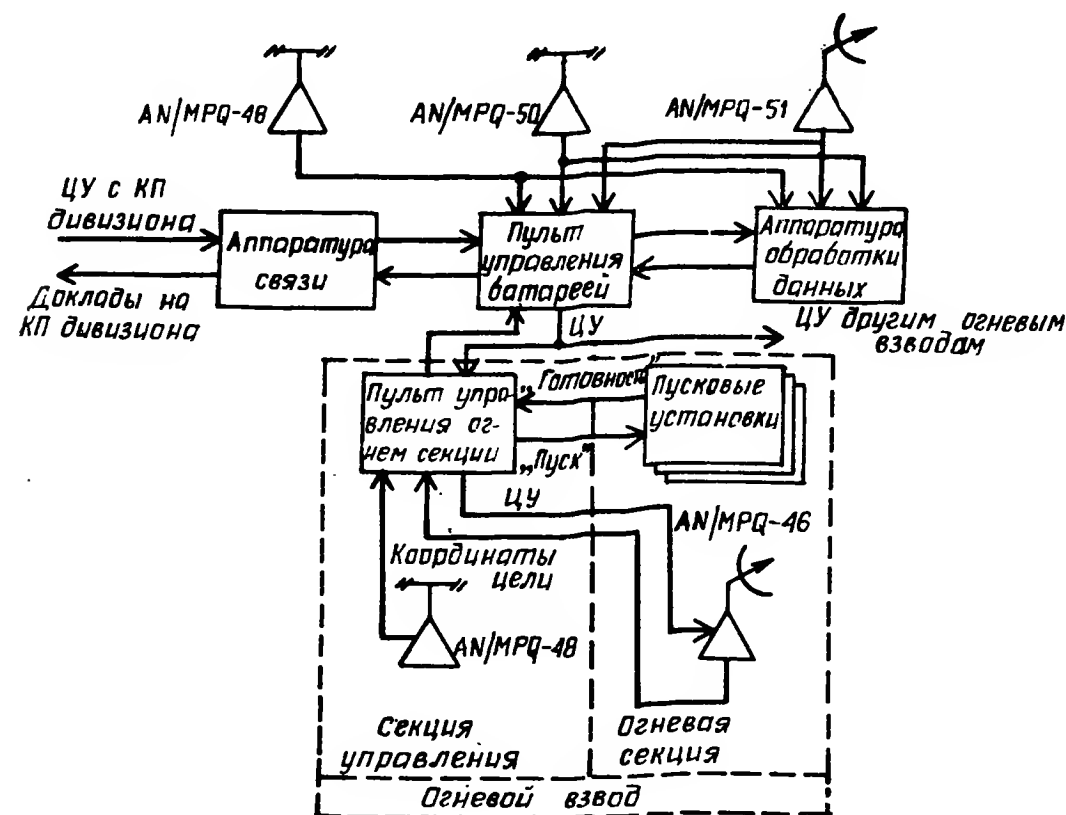


Рис. 11.15. Состав и взаимодействие аппаратуры управления огнем батареи «Хок»

Если цель оказывается в пределах разрешенной дальности, офицер тактического управления производит пуск ракеты. Каждый огневой взвод может обстрелять одну цель.

После окончания активного участка полета ракеты РГС производит повторный захват цели и осуществляет наведение ракеты на цель. Ракета наводится в упрежденную точку встречи методом пропорционального сближения. Подрыв ракеты осуществляется неконтактным полуактивным радиовзрывателем.

При подавлении РЛС подсвета цели она переходит в режим сопровождения источника помех. В этом случае для измерения дальности до цели используется автономный дальномер АН/МРQ-51. В РГС ракеты предусмотрен режим пассивного само-

наведения на источник помех. При отсутствии целеуказания с КП дивизиона на КП батареи имеется аппаратура, которая позволяет решить задачу целераспределения. Кроме того, в состав каждой огневой батареи входит секция управления, которая позволяет вести автономный обстрел целей при выходе из строя аппаратуры управления КП батареи, что позволяет повысить живучесть системы в целом.

11.2.3. Радиоэлектронные средства ЗРК «Пэтриот»

ЗРК «Пэтриот» предназначен для уничтожения самолетов, крылатых и оперативно-тактических ракет в большом диапазоне высот, дальностей и скоростей полета. Основные ТТД ЗРК: максимальная дальность стрельбы — 100 км; эффективная дальность стрельбы на больших и средних высотах — 70 км, на малых высотах — 40 км; минимальная дальность стрельбы — 3 км; верхняя граница зоны поражения — 30 000 м; нижняя граница зоны поражения — 60 м; вероятность поражения цели — 0,8; диапазон скоростей поражаемых целей — 30—900 м/с; максимальная скорость ракеты — 1600 м/с; масса ракеты — 853 кг; число одновременно обстреливаемых целей батарей — 8; боевая часть ракеты — обычная или ядерная.

Система радиуправления ракеты — комбинированная: на начальном участке траектории используется автономное (программное) управление, на среднем — командное 1-го вида, на конечном — командное 2-го вида. Предусматривается использование на конечном участке полета ракеты активной РГС.

В состав батареи входят: многофункциональная РЛС, пульт управления, 5 пусковых установок, комплект из 50 ЗУР, средства радиосвязи, источники электропитания.

Многофункциональная РЛС АН/МРQ-53 предназначена для обнаружения, опознавания и сопровождения воздушных целей и передачи на ракеты команд управления. При обстреле целей на больших и средних высотах используются сложные сигналы с низкой частотой повторения импульсов (НЧПИ). Мощность в импульсе $P_{\text{и}} = 1$ МВт, длительность импульса $\tau_{\text{и}} = 200$ мкс, частота следования импульсов $F_{\text{и}} = 100 \div 200$ Гц, коэффициент сжатия $B = 200$ (используется внутриимпульсная линейно-частотная модуляция). Ширина ДНА в обеих плоскостях $\varphi_{0,5} = 1,8 \div 2,1^\circ$. При обстреле низколетящих целей в РЛС используется режим с высокой частотой повторения импульсов (ВЧПИ). Сектор обзора по азимуту — $110 \div 120^\circ$, по углу места — 90° , дальность обнаружения целей — 150 км.

Антенная система РЛС состоит из основной приемно-передающей фазированной антенной решетки ФАР (диаметром 2,4 м), состоящей из 5161 элемента; приемной ФАР системы наведения ракеты, состоящей из 251 элемента; пяти приемных ФАР (по 51 элементу в каждой) для повышения помехозащищенности РЛС; ФАР системы опознавания, работающей в диапазоне частот 0,12—1,7 ГГц.

Основная ФАР работает в диапазоне частот 4—6 ГГц, исполь-

зуется для поиска, сопровождения целей и ракет, а также передачи на борт ракет команд наведения.

Приемная ФАР системы наведения ракеты используется для приема необходимой информации с борта ракеты при ее наведении на конечном участке траектории. Пять приемных ФАР используются для повышения помехозащищенности РЛС, с их помощью осуществляется подавление сигналов, принятых по боковым лепесткам ДНА.

В состав РЭС ракеты входят: РГС с двумя приемными каналами (один — для приема отраженного от цели сигнала, другой — для приема сигналов подсвета); аппаратура передачи данных на пункт управления; аппаратура приема команд управления ГСН и ЗУР.

Данные о координатах и параметрах движения ракет и целей, получаемые с помощью РЛС, обрабатываются на пункте управления (ПУ). Команды наведения с ПУ передаются на ракеты с помощью РЛС.

В ЗРК «Пэтриот» РЛС может работать в режиме обзора и в режиме математического сопровождения целей и наведения ракет. Управление работой РЛС осуществляется ЦЭВМ.

Состав аппаратуры системы управления огнем ЗРК «Пэтриот» показан на рис. 11.16.

В режиме обзора ДНА РЛС перемещается дискретно в заданном пространстве. Данные о целях поступают в ЭВМ. В процессе обнаружения целей производится их опознавание. РЛС способна одновременно сопровождать свыше 100 целей. Информация о целях отображается на индикаторных устройствах и пультах в виде символов.

После принятия решения на перехват воздушной цели производится пуск ракеты. На начальном участке траектории ракета движется по программной траектории. При обнаружении ракеты РЛС осуществляет ее сопровождение. В ЭВМ для каждой пары ракета — цель рассчитываются координаты упрежденной точки встречи и команды наведения, которые с помощью РЛС передаются на ракету. На среднем участке ракета наводится на цель по трехточечному методу параллельного сближения.

На конечном участке траектории ракета наводится на цель командным методом второго вида (методом пропорционального сближения). Суть этого метода состоит в следующем. РЛС формирует два луча. Один из них сопровождает цель, другой — ракету. Отраженные от цели сигналы улавливаются и обрабатываются РГС ракеты и транслируются на ПУ. Вместе с этими сигналами на ПУ передаются также данные датчиков углов поворота рулей и антенны РГС. На ПУ данные о цели, полученные РГС и РЛС, сравниваются между собой. Если необходима корректировка траектории полета ракеты, вырабатываются команды наведения (команды управления стробом скорости системы АСС, антенной РГС и рулями ракеты). Если сигналы целей, транслированные на ПУ, разрешаются по скорости (частоте Доплера), оператор имеет возможность по своему

усмотрению выработать команду целеуказания для наведения ракеты на одну из них.

По сравнению с батареями ЗРК «Найк-Геркулес» и «Хок» батарея ЗРК «Пэтриот» обладает большей пропускной способностью, более высокой помехозащищенностью и мобильностью.

11.2.4. Радиоэлектронные средства ЗРК «Чапэрэл»

а) Основные ТТД ЗРК «Чапэрэл». Состав, характеристика РЭС ЗРК. Среди ЗРК ближнего действия стран НАТО наибольшее распространение получили комплексы «Чапэрэл», «Ред Ай», «Стингер» (США) и др. Они предназначены для защиты войск на поле боя, позиций ЗРК средней и большой дальности и других объектов от ударов противника с воздуха. Основные ТТД ЗРК «Чапэрэл»: диапазон дальности действия — 2—5 км; диапазон высот применения — 0,15—3 км; стартовая масса ЗУР — 84 кг; масса боевой части ЗУР — 5 кг; максимальная скорость полета ЗУР — 850 м/с. ЗУР поражает цели, летящие со скоростями не более 550 м/с, имеет пассивную ТГС.

ТГС ЗУР имеет дальность захвата 14 км, угол зрения 1,5°, ширину спектра чувствительности 3—5,5 мкм, вероятность поражения цели 0,7—0,8, метод наведения ЗУР — пропорциональное сближение.

ЗУР снабжена ударным и неконтактным ИК-взрывателем.

ЗРК «Чапэрэл» организационно входят в состав смешанных дивизионов, которые состоят из двух батарей ЗРК «Чапэрэл» (по 12 ПУ в каждой) и двух батарей ЗСК «Вулкан» (по 12 20-мм шестиствольных установок). Батарея ЗРК «Чапэрэл» состоит из трех взводов. Каждый взвод имеет по четыре гусеничных самоходных установки. На каждой ПУ самоходной установки находятся четыре ракеты.

Управление огнем батареи «Чапэрэл» осуществляется с помощью АСУ ФААР (в составе дивизиона их может быть до семи комплектов). АСУ ФААР (АН/МРQ-49) состоит из РЛС обнаружения воздушных целей (целеуказания), выносного индикатора, аппаратуры опознавания воздушных целей, системы кодирования целей, радиостанции.

На самоходной установке «Чапэрэл» имеются дистанционный индикатор, оптический визир, дальномер, радиостанция, ракеты с ТГС.

РЛС целеуказания АН/TPS-32 является импульсно-доплеровской, работает в диапазоне 390—1550 МГц в режиме кругового обзора. Пульт управления и выносной индикатор позволяют решать задачи целераспределения и вырабатывать команды целеуказания, которые кодируются и передаются с помощью радиостанции АН/VRC-46 на самоходные установки. Радиостанция работает в диапазоне 39—76 МГц. Принятые радиосигналы приемниками, установленными на самоходных установках, отображаются на инди-

каторах АН/GSG-137. Оптический визир используется оператором для сопровождения цели по угловым координатам.

Ракеты с ТГС предназначены для поражения воздушных целей. Дальномер АН/VPQ-2 позволяет измерить дальность до цели. Он работает в импульсном режиме в диапазоне 3 см с частотой следования импульсов $F_{\text{и}}=20$ кГц и длительностью импульсов $\tau_{\text{и}}=0,2$ мкс.

б) Принцип функционирования системы управления огнем ЗРК «Чапэрэл». Принцип функционирования системы управления огнем поясняется функциональной схемой 11.17. КП батареи размещается на самоходной установке вбли-

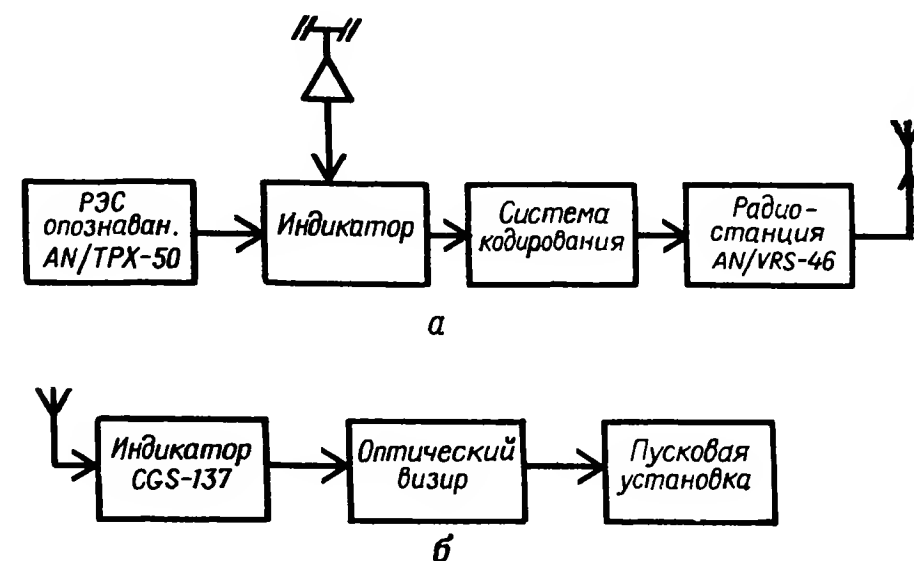


Рис. 11.17. Структурная схема системы управления огнем ЗРК «Чапэрэл»: состав РЭС КП батареи (а); состав РЭС самоходной установки (б)

зи месторасположения РЛС целеуказания. КП батареи получает сигнал тревоги по сети оповещения ПВО с КП дивизиона. По этому сигналу включается РЛС целеуказания, которая позволяет обнаружить и опознать цели, находящиеся в зоне поражения ЗРК. Приняв решение о распределении целей между самоходными установками, командир батареи дает целеуказания их операторам. Принятая информация отображается на дистанционных индикаторах, установленных на ПУ самоходных установок. На каждой самоходной установке также имеется оптический визир, с которым синхронно связана ПУ. Оператор с помощью указанного визира обнаруживает и сопровождает цель. При этом ТГС, первоначально ориентированные вдоль оси ракет, оказываются тоже направленными на цель. После захвата цели ТГС разарретируется и начинает слежение за ней. Оператор после захвата цели слышит в наушниках звуковой сигнал и производит пуск одной из ракет, если цель находится в пределах разрешенной дальности. После пуска ракеты оператор может сразу приступить к обстрелу другой цели.

11.3. Радиоэлектронные средства ЗСК

В состав активных средств ПВО входят ЗСК, предназначенные для прикрытия войск на поле боя, на марше и для защиты важных объектов от средств воздушного нападения. В состав ЗСК входят пушки, РЛС разведки и целеуказания, РЛС слежения за целью (станции орудийной наводки — СОН), прибор управления артиллерийским зенитным огнем (ПУАЗО).

СОН предназначены для обнаружения и опознавания воздушных целей, определения координат и параметров движения выбранной для обстрела цели. Измеренные данные поступают в ПУАЗО. Используя эти данные, РЛС решает задачу прицеливания орудий. По данным ПУАЗО осуществляется автоматическая наводка пушек на угол, обеспечивающий попадание снаряда в упрежденную точку встречи с целью.

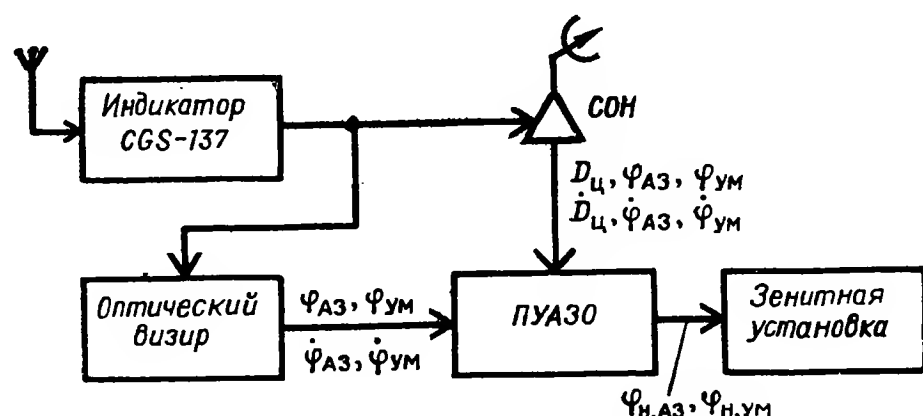


Рис. 11.18. Схема управления огнем батареи типового ЗСК

Наиболее распространенными ЗСК стран НАТО являются комплексы «Вулкан» (США) и «Гепард» (ФРГ). Их основные ТТД приведены в табл. 9.2. Современные ЗСК имеют следующие обобщенные ТТД: калибр — 20—40 мм; число стволов — 2—6; скорострельность — 500—3000 выстр./мин; зона досягаемости огня по дальности — 2—5 км, по высоте 1—4 км. В качестве прицельного устройства используется оптический визир, дальномер или трехкоординатная РЛС (СОН). Организационно ЗСК «Вулкан» входят в состав батарей смешанных дивизионов. Каждая батарея «Вулкан» состоит из 12 самоходных установок по 4 установки в каждом взводе. Управление огнем батареи ЗСК «Вулкан» осуществляется с помощью АСУ ФААР. В состав типового ЗСК входят (рис. 11.18): линия радиосвязи, дистанционный индикатор, РЛС слежения за целью (СОН), оптический визир, ПУАЗО.

Схема управления огнем батареи типового ЗСК приведена на рис. 11.18. Управление огнем батареи осуществляется с поста. Получив целеуказание, командир батареи дает команду оператору СОН обнаружить и захватить цель. После захвата цели РЛС осуществляет сопровождение этой цели по дальности (скорости) и угловым координатам. С выхода РЛС в режиме автосопровождения в

ПУАЗО поступают значения координат цели и их производные. По этим данным в ПУАЗО вычисляются углы упреждения (наводки) орудий, которые отрабатываются приводами лафетов зенитных установок.

11.4. Радиоэлектронные средства истребителей-перехватчиков

Истребители-перехватчики (ИП) предназначены для уничтожения воздушного противника главным образом на дальних подступах к прикрываемым районам и объектам. Они вооружены УР, стрелково-пушечным вооружением и неуправляемыми реактивными снарядами (НУРС). Основные типы истребителей стран НАТО и их ТТД приведены в табл. 9.3.

ИП являются составной частью авиационного комплекса перехвата. Комплекс перехвата, включающий в свой состав наземные и бортовые средства истребителя и УР, обеспечивает: дальнейшее обнаружение и опознавание воздушных целей, оценку боевой обстановки, выбор типов истребителей и расчет потребного их количества, взлет и наведение истребителей в район воздушных целей, их поиск, обнаружение и опознавание, определение координат целей с помощью бортовой РЛС истребителя, самонаведение истребителя на цель до его выхода в зону атаки ракетами, прицеливание, подготовку системы управления ракетами и пуск ракет, наведение УР, подрыв их боевых зарядов (частей) и поражение целей, возвращение истребителя на свой аэродром. Для решения перечисленных задач широко применяются РЭС. Одними из важных бортовых РЭС являются РЛС перехвата и прицеливания истребителей.

11.4.1. Общая характеристика бортовых РЛС истребителей

Бортовые РЛС истребителей обеспечивают: поиск, обнаружение, захват и автосопровождение воздушной цели, выбранной для поражения; выдачу исходных данных, по которым производится вывод истребителя в зону пуска ракет; наведение УР с полуактивной РГС; ведение стрельбы из пушек. Основные ТТД некоторых РЛС истребителей капиталистических стран приведены в табл. 11.3.

РЛС работают в режиме импульсного излучения в диапазоне длин волн 3 см, причем РЛС устаревших типов используют импульсные сигналы с большой скважностью (НЧПИ). Частота повторения импульсов в этих РЛС равна $F_{\text{п}} = 500 \div 3000$ Гц, длительность импульсов $\tau_{\text{и}} = 0,4 \div 1$ мкс, ширина диаграммы направленности антенны в обеих плоскостях $\phi_{0,5} = 3 \div 5^\circ$, мощность в импульсе $P_{\text{и}} = 200 \div 400$ кВт, селекция цели осуществляется по дальности (система АСД). Устаревшие РЛС используют системы АСН с коническим сканированием. Некоторые из них являются моноимпульсными.

Таблица 11.3

Основные ТТД РЛС истребителей капиталистических стран

Тип РЛС (страна)	Место установки	D_{max} , км $\sigma_{\text{ц}}$, м	$P_{\text{и}}$ ($P_{\text{ср}}$), кВт	$F_{\text{п}}$, кГц $\tau_{\text{и}}$, мкс	К-во сопровождаемых целей Способность обнаруживать НЛЦ	$\alpha_{\text{з}}$, ° $\alpha_{\text{ум}}$, °	Метод пеленгации Метод селекции
AN/APQ-120 (США)	F-4E	53 1	165	0,5; 1 2; 0,4	1 Нет	3,5 3,5	к д
«Сирано»-4 (Франция)	«Мираж» F-1-C	110 •	225	Низкая •	1 Нет	•	м д
AWG-9 (США)	F-14	210 5	(5)	200; 1 1	20 Да	2,8 2,8	м с (д)
AN/APG-63 (США)	F-15	175 5	(1)	200; 10; 1 3—10	1 Да	2,5 2,5	м с (д)
AN/APG-66 (США)	F-16	30 1	(0,2)	Низкая, средняя •	1 Да	3,3 3,3	м с (д)
AN/APG-65 (США)	F-18	40—50 1	(0,45)	Низкая, средняя, высокая •	10 Да	2,7 2,7	м с (д)
RDI (Франция)	«Мираж» 2000	100 5	•	Низкая, средняя, высокая •	• Да	•	м с (д)
«Фокс Хантер» (Великобритания)	«Торнадо» F.2	185 •	•	Низкая, средняя, высокая •	12—20 Да	•	м с (д)

Примечания: м — моноимпульсный; к — коническое сканирование; д — по дальности; с — по скорости; НЛЦ — низколетящие цели.

В бортовых РЛС предусмотрены два режима работы: режим обнаружения и режим автоматического сопровождения. В режиме обнаружения осуществляется обзор пространства в передней полу-

сфере самолета в секторе ± 40 — 70° по азимуту и ± 5 — 10° по углу места. Основным методом обзора является строчной со временем обзора 2—3 с. Сектор обзора по углу места может изменяться летчиком в пределах ± 20 — 30° .

При сближении с выбранной для атаки целью РЛС переключается в режим автосопровождения. В этом режиме РЛС сопровождает только одну цель или их группу, если цели не разрешаются по дальности и угловым координатам. Подобные РЛС обеспечивают сопровождение лишь одной цели и не позволяют атаковать низколетящие цели.

РЛС истребителей нового поколения (F-14, F-15, F-16, «Мираж» 2000, «Торнадо») и вновь разрабатываемых самолетов обладают большей дальностью обнаружения целей не только в верхней полусфере, но и на фоне земли, повышенной разрешающей способностью по скорости, высокой точностью измерения координат и параметров движения целей, обеспечивают одновременное сопровождение до 20 целей. Это достигается использованием в них импульсных сигналов с ВЧПИ и СЧПИ, увеличением мощности излучения, моноимпульсными методами пеленгации.

Режим высокой частоты повторения импульсов (ВЧПИ) обеспечивает большую дальность обнаружения низколетящих целей при значительных скоростях сближения (на встречных курсах). Режим средней частоты повторения импульсов (СЧПИ) имеет преимущества при малых скоростях сближения (на догонных курсах). Использование режимов ВЧПИ и СЧПИ позволяет успешно обнаруживать низколетящие цели. Для обнаружения и точного измерения координат наземных целей, а также воздушных целей в верхней полусфере используется режим НЧПИ. Наличие трех режимов работы является отличительной чертой как современных, так и перспективных РЛС (F-15, F-18 и др.). Особенностью перспективных РЛС является также и то, что они позволяют одновременно сопровождать несколько воздушных целей (сопровождение «на проходе»).

В данных РЛС селекция целей по скорости осуществляется в режимах ВЧПИ и СЧПИ, а в режиме НЧПИ — и по дальности. Скорость, направление, положение каждой цели в пространстве определяются за время, равное двум периодам обзора. АРКП, использующие подобные РЛС, являются многоцелевыми. Бортовая РЛС позволяет сопровождать более 20 целей. Возможно поражение нескольких целей. При этом обеспечиваются скрытность взятия целей на сопровождение и наведения на них ракет. Выделение одной цели из плотного боевого порядка и ее сопровождение с высокой точностью достигается путем анализа тонкой структуры отраженных сигналов и использования моноимпульсного метода пеленгации.

РЛС современных истребителей работают в 3-сантиметровом диапазоне длин волн. Средняя мощность излучения РЛС находится в пределах от 0,2 до 5 кВт. В качестве антенны используется плоская щелевая фазированная антенная решетка с механическим

сканированием луча (AN/APG-66), обеспечивающая обзор пространства по азимуту в пределах $\pm 60^\circ$. При автоматическом сканировании обзор может производиться также в секторах ± 30 и $\pm 10^\circ$. Обзор по углу места осуществляется в пределах $\pm 60^\circ$, а в автоматическом режиме — 12, 6, 5, 3° . При установке переключателя выбора вида оружия в положение РАКЕТЫ ЦВМ вырабатывает сигналы ЦУ для ориентации ГСН УР и рекомендации по их пуску. При установке переключателя в положение ПУШКА ЦВМ производит расчет траектории полета снарядов.

В перспективных РЛС истребителей возможны также режимы: огибание рельефа местности и обход препятствий, работа с радиомаяком, обычный обзор земной поверхности, сопровождение воздушных целей моноимпульсным методом, а также постоянный подсвет цели непрерывным или импульсным излучением для наведения УР.

В современных РЛС для повышения помехозащищенности используются: перестройка (электромеханическая, электронная) по частоте; режим сопровождения источника помех; селекция импульсов по длительности и частоте повторения; компенсация сигналов, принимаемых по боковым лепесткам; стробирование приемников по дальности (скорости); устройства селекции движущихся целей.

11.4.2. Радиоэлектронные средства ракет класса «воздух — воздух»

В качестве основного средства поражения воздушных целей применяются УР класса «воздух — воздух» с полуактивным и пассивным самонаведением. Основные типы и ТТД управляемых ракет капиталистических стран приведены в табл. 11.4.

В качестве сигналов подсвета в полуактивных РГС используются либо сигналы бортовой РЛС истребителя, работающей в режиме автосопровождения, либо автономного передатчика подсвета, сопрягаемого с РЛС. В последнем случае подсвет цели осуществляется непрерывными сигналами, что обеспечивает наведение ракет на низколетящие цели. Передатчик подсвета включается при работе РЛС в режиме автосопровождения цели и излучает непрерывные сигналы с частотной модуляцией мощностью 150—200 Вт.

РГС работают в 3-сантиметровом диапазоне длин волн. В РГС с непрерывным и квазинепрерывным излучением осуществляется селекция цели по скорости, а в импульсных РГС — по дальности. Основным методом пеленгации является метод конического сканирования. В более совершенных РГС («Скайфлэш») используется моноимпульсный метод.

Все ракеты класса «воздух — воздух» являются самонаводящимися. При наведении используют метод пропорционального сближения. По дальности действия эти ракеты делятся на ракеты малой (с дальностью стрельбы $D_c < 20$ км), средней ($20 \text{ км} \leq D_c \leq 50$ км) и большой дальности стрельбы ($D_c > 50$ км).

Таблица 11.4

Основные ТТД управляемых ракет капиталистических стран

Наименование (страна)	Масса стартовая боевой части, кг	Дальность пуска максимальная, минимальная, км	Высота поражения максимальная, минимальная, км	Ракурс цели спереди сзади	Система самонаведения
«Сайдвиндер» (США): AIM-9E	$\frac{84}{11}$	$\frac{18}{\cdot}$	$\frac{23}{0,6}$	$\frac{—}{0-4/4}$	Инфракрасная
AIM-9H	$\frac{84}{11}$	$\frac{18}{\cdot}$	$\frac{25}{\cdot}$	$\frac{—}{0-4/4}$	»
«Спарроу» (США): AIM-7E	$\frac{205}{30}$	$\frac{25}{\cdot}$	$\frac{26}{\cdot}$	$\frac{0-4/4}{0-4/4}$	Радиолокац., полуактивн., непрерывн.
AIM-7F	$\frac{230}{39}$	$\frac{40}{\cdot}$	$\frac{27}{\cdot}$	$\frac{0-4/4}{0-4/4}$	Радиолокац., полуактивн., импульсно-доплеровск.
«Феникс»-54A (США)	$\frac{443}{60}$	$\frac{140}{\cdot}$	$\frac{30}{\cdot}$	$\frac{0-4/4}{0-4/4}$	Комбиниров. радиолокац. (полуактивн.+ активная)
«Ред Топ» (Великобритания)	$\frac{170}{31}$	$\frac{15}{1}$	$\frac{20}{1}$	$\frac{2/4-4/4}{0-4/4}$	Инфракрасная
«Скайфлэш» (Великобритания)	$\frac{200}{30}$	$\frac{25}{\cdot}$	$\frac{25}{\cdot}$	$\frac{0-4/4}{0-4/4}$	Радиолокац., полуактивн., непрерывн.
«Мажик» R-550 (Франция)	$\frac{88}{12,5}$	$\frac{8}{0,3}$	$\frac{25}{\cdot}$	$\frac{—}{0-4/4}$	Инфракрасная
«Аспид» 1A (Италия)	$\frac{220}{33}$	$\frac{50}{\cdot}$	$\frac{\cdot}{\cdot}$	$\frac{0-4/4}{0-4/4}$	Радиолокац., полуактивн.

К ракетам малой дальности относятся УР «Сайдвиндер» (США), «Ред Топ» (Великобритания), «Матра» R-530 и «Мажик» R-550 (Франция) и др.

Большинство ракет оснащаются тепловыми головками самонаведения (ТГС). Однако такие ракеты наводятся только со стороны задней полусферы. Селекция цели в импульсных полуактивных РГС осуществляется по дальности, а в ТГС — по угловым ко-

ординатам. Пеленгация цели производится разностным методом (в РГС — методом конического сканирования или моноимпульсным методом, в ТГС — сканированием модулирующего диска).

Наиболее распространенной УР малой дальности являются «Сайдвиндер» (США).

Ракеты этого типа заменяются ракетами LCLM и ASRAAM. Ракета LCLM будет оснащена ТГС и активным радиовзрывателем, ТГС УР ASRAAM будет иметь матричный приемник лучистой энергии, что повысит ее помехозащищенность по сравнению с ТГС со сканированием моделирующего диска.

Во Франции совершенствуется ракета «Мажик» R-550. Планируется повысить чувствительность и помехозащищенность ее ТГС.

К УР средней дальности класса «воздух — воздух» стран НАТО относятся «Спарроу» (США), «Скайфлэш» (Великобритания) и «Супер Матра» R-530 (Франция). Все они наводятся на цели методом пропорционального сближения и снабжены полуактивными РГС. В РГС УР «Спарроу» и «Супер Матра» R-530 для пеленгации цели используется метод сканирования, а РГС «Скайфлэш» — моноимпульсная с непрерывным сигналом подсвета.

В Италии на вооружении состоит ракета «Аспид» 1А (создана на базе «Спарроу» AIM-7E), имеющая большую дальность стрельбы и повышенную помехозащищенность благодаря использованию моноимпульсной РГС.

Большое распространение получили УР «Спарроу» AIM-7F, оснащенные полуактивной РГС с квазинепрерывным сигналом подсвета. При их работе используются сигналы бортовой РЛС. На смену этой ракеты на вооружение поступает ее усовершенствованный вариант — «Спарроу» AIM-7M.

В настоящее время разрабатывается УР AMRAAM. На начальном и среднем участках траектории наведение ракеты будет осуществляться инерциальной системой, а на конечном участке — активной моноимпульсной РГС.

Представителем УР большой дальности является ракета «Феникс» AIM-54A (США), состоящая на вооружении истребителя F-14 «Томкэт». Она оснащена комбинированной РГС (полуактивной и активной), радиолокационным и контактным взрывателями. На смену этой ракеты будет поступать усовершенствованный вариант — «Феникс»-54C.

В США ведутся работы по созданию ракеты большой дальности AIAAM, разрабатывается также активная РГС, работающая в миллиметровом диапазоне волн. Переход в этот диапазон позволит улучшить разрешающую способность по угловым координатам, повысить помехозащищенность и др. Основными мерами защиты РГС от помех являются:

- использование селекции по скорости (сигналов с непрерывным и квазинепрерывным излучением);
- наведение на источник помех;
- использование комбинированных систем наведения.

Развитие управляемых ракет класса «воздух — воздух» осуще-

ствляется по пути увеличения дальности действия, повышения помехозащищенности, расширения диапазона высот боевого применения, освоения новых диапазонов длин волн и др.

Глава 12. СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВВС

12.1. Организационная структура автоматизированной системы управления тактической авиации

Зарубежные военные специалисты считают, что высокая эффективность боевых действий тактической авиации (ТА) может быть достигнута только при применении автоматизированных систем управления (АСУ).

Для управления боевыми действиями ТА применяются различные АСУ. Одной из них является АСУ «485-L». Указанная АСУ осуществляет: сбор, обработку и отображение информации о воздушной обстановке; передачу приказов и распоряжений в соответствующие звенья системы управления; управление самолетами ТА при нанесении ударов по наземным объектам; взаимодействие ТА с сухопутными войсками и армейской авиацией; выработку команд самолетам ТА при отражении воздушного нападения.

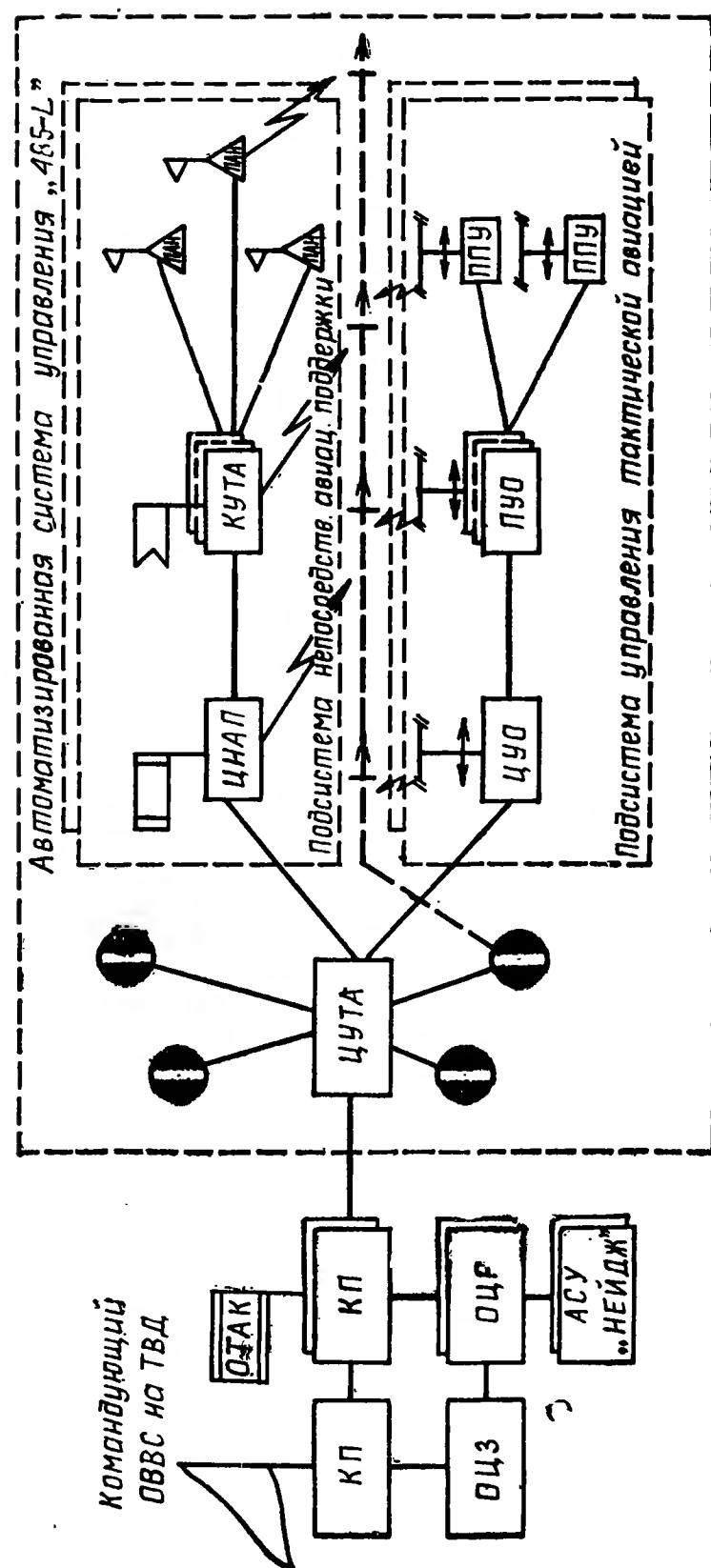
Система «485-L» состоит из подсистем получения данных, подсистемы обработки и отображения информации и подсистемы связи. Основу подсистемы получения данных составляют РЛС обнаружения, установленные в различных центрах, на постах и самолетах. Обработка и отображение информации осуществляются с помощью различных ЭВМ и электронных пультов. Передача информации от РЛС на пункты управления, команд наведения самолетов производится объединенной тактической системой распределения информации ДЖИТИДС.

Упрощенная организационная структура АСУ «485-L» приведена на рис. 12.1. Управление ТА на ТВД осуществляет центр управления ТА (ЦУТА). В ЦУТА производится оценка воздушной обстановки, анализируются данные о вооруженных силах противника, вырабатываются решения на боевые действия ТА, планируются как воздушные операции, так и вылеты отдельных групп самолетов, распределяются силы и средства авиации по заявкам сухопутных войск. В составе центра имеются средства связи, аппаратура отображения данных и другое оборудование.

Основными средствами связи ЦУТА являются:

— узел связи AN/TSC-60 (обеспечивает телефонную и телеграфную связь с наземными абонентами и экипажами самолетов в воздухе). Мощность передатчика — 1 кВт;

— узлы связи AN/TSC-60A и AN/TSC-60B (аналогичны AN/TSC-60, но мощность передатчиков 2,5 и 10 кВт соответственно);



— узел передачи данных AN/GSQ-119(V) (с помощью радиорелейной станции, аппаратуры уплотнения каналов передачи радиолокационных данных, телефонной и буквопечатающей связи обеспечивается телефонная, фототелеграфная и буквопечатающая передача информации в аналоговой и цифровой форме);

- станция тропосферной связи AN/TRC-97A (позволяет вести дуплексную телефонную, буквопечатающую и цифровую связь);
- узел буквопечатающей связи AN/TGC-28 (осуществляет передачу и прием информации как внутри системы управления, так и с органами управления).

Подсистемы, входящие в состав АСУ, позволяют решать задачи по непосредственной авиационной поддержке боевых действий сухопутных войск и по управлению тактической авиацией при нанесении ударов по наземным целям.

12.2. Подсистема управления ТА

Подсистема управления ТА АСУ «485-Л» считается основной и обеспечивает сбор, обработку, передачу и отображение информации о воздушной обстановке и боеготовности своих сил и средств. В подсистеме осуществляется планирование вылетов, координация действий ТА, управление самолетами. В ее состав входят центры управления и оповещения (ЦУО), пункты управления и оповещения (ПУО), передовые посты управления (ППУ).

В ЦУО решаются задачи по обнаружению, обеспечению и сопровождению воздушных целей, по управлению самолетами в заданном воздушном пространстве. Кроме того, ЦУО осуществляет управление боевыми действиями авиации при выходе из строя ЦУТА. ЦУО оснащены РЛС, позволяющими обнаруживать воздушные цели на дальностях более 400 км. Дополнительная информация о воздушной обстановке поступает в ЦУО от подчиненных ему ПУО. ЦУО непосредственно подчиняются ЦУТА и разворачиваются примерно в 150 км от линии фронта. В состав ЦУО входят: трехкоординатная РЛС обнаружения AN/TPS-43, двухкоординатная РЛС AN/TPS-44, УКВ-радиостанции AN/FRC-110 и AN/FRC-116, а также средства связи и отображения данных, подобные средствам ЦУТА. Совместно с двухкоординатными РЛС работают радиолокационные высотомеры. Для определения угла места воздушных целей в трехкоординатных РЛС используются антенны с парциальными диаграммами направленности (AN/TPS-43) или фазированные антенные решетки (AN/TPS-59).

Повышение помехозащищенности РЛС обеспечивается применением сложных сигналов, быстрой перестройкой несущей частоты в рабочем диапазоне, подавлением помеховых сигналов, принимаемых по боковым лепесткам диаграммы направленности антенны.

ПУО подчиняются ЦУО и решают те же задачи, но в меньшем объеме. ПУО разворачиваются в 60—80 км от линии фронта. Информация о воздушной обстановке с ПУО передается в ЦУО. Уп-

равление боевыми действиями самолетов с ПУО осуществляется в ограниченном районе.

В подчинении ПУО имеется несколько ППУ, которые обеспечивают обнаружение и опознавание воздушных целей. ППУ развертываются на удалении 10—30 км от линии фронта. В состав аппаратуры ППУ входят оперативный центр АН/ТСQ-61, РЛС типа АН/TPS-44 и средства связи.

12.3. Подсистема непосредственной авиационной поддержки

Подсистема непосредственной авиационной поддержки служит для согласования взаимных действий ТА и сухопутных войск. Она принимает и анализирует заявки на авиационную поддержку и воздушную разведку, поступающие от сухопутных войск, согласовывает по месту и времени действия ТА и наземных сил и средств, а также управляет самолетами непосредственной авиационной поддержки. Центры непосредственной авиационной поддержки (ЦНАП) являются основными органами управления рассматриваемой подсистемы. Они осуществляют взаимодействие ТА с армейскими корпусами и развертываются при центрах управления боевыми действиями (ЦУБД) армейских корпусов. В целях оперативного использования ТА при ЦУБД дивизий и группах координации огневой поддержки бригад и батальонов организуются команды управления тактической авиацией (КУТА). Последние подают заявки от подразделений сухопутных войск на авиационную поддержку и воздушную разведку непосредственно в ЦНАП. В состав КУТА входят офицеры связи, передовые авианаводчики и радиосвязисты. КУТА являются непосредственными связующими звеньями между авиацией и сухопутными войсками. Наведение самолетов на цели осуществляют передовые авиационные наводчики (ПАН). В зависимости от характера боевых действий ПАН могут находиться на земле или в воздухе.

На рис. 12.2 приведена схема управления ТА при выполнении ею задач по непосредственной авиационной поддержке сухопутных войск. Решение командующего ЦУТА передается командирам подчиненных ему авиационных частей, которые определяют составы боевых групп, маршруты и профили их полета, уточняют им задачи, боевую нагрузку и т. д. О готовности части к выполнению боевого задания командиры докладывают в ЦУТА. Сразу после взлета командиры боевых групп устанавливают связь с ЦУТА, а по мере приближения к линии фронта — связь с ЦУО, ПУО и ПАН. Последние организуют вывод самолетов в район заданных объектов. Заявки частей и подразделений сухопутных войск на непосредственную авиационную поддержку и воздушную разведку направляются через КУТА в ЦНАП. Порядок вызова самолетов по заявке зависит от конкретных условий и осуществляется по двум направлениям:

— передовой авианаводчик — дежурная группа самолетов;

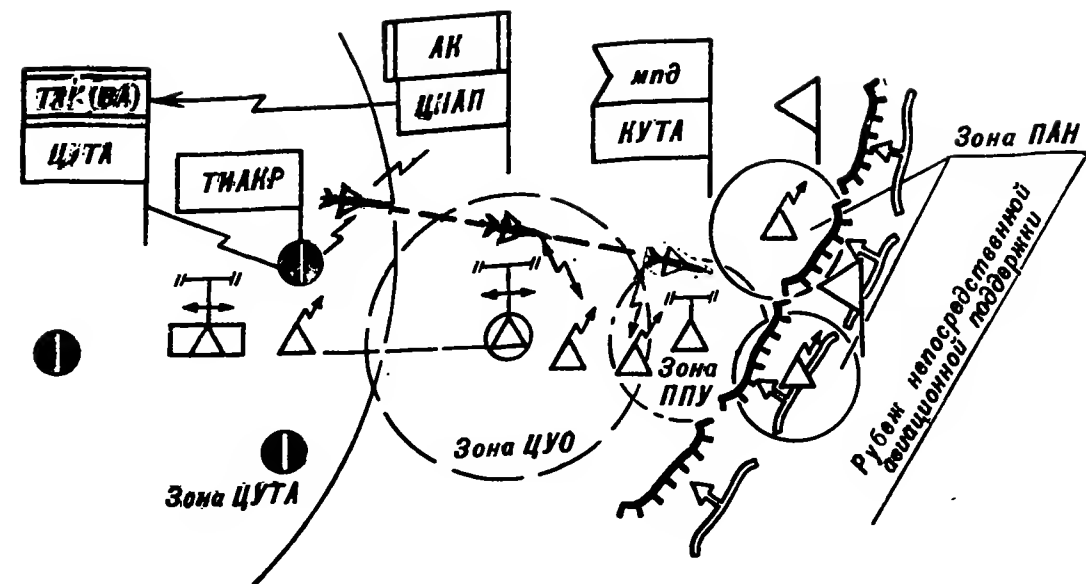


Рис. 12.2. Схема управления ТА при выполнении задач по непосредственной авиационной поддержке сухопутных войск

— передовой авианаводчик — самолет (ретранслятор) — дежурная группа самолетов на аэродроме, находящаяся в состоянии готовности к вылету (рис. 12.3).

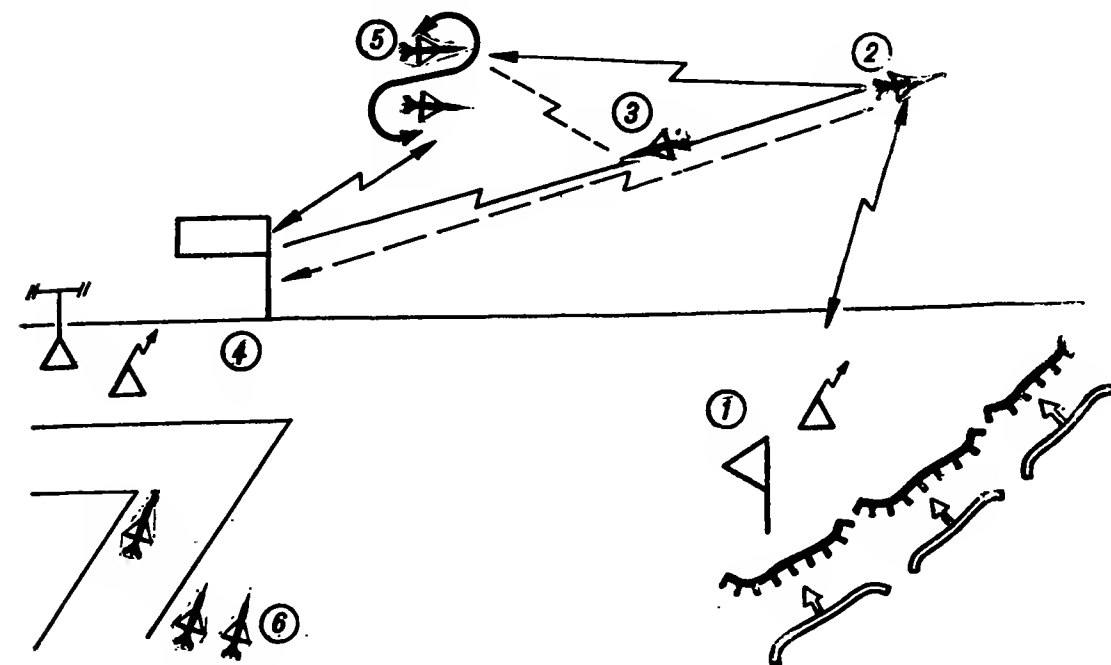


Рис. 12.3. Схема вызова самолетов по заявкам на непосредственную авиационную поддержку:

1 — КП командира батальона; 2 — ПАН; 3 — самолет-ретранслятор; 4 — КП дежурного подразделения; 5 — самолеты в зоне дежурства в воздухе; 6 — дежурные самолеты на аэродроме

С получением приказа со своего командного пункта (КП) дежурная группа направляется в район цели по данным, полученным от ПАН, наносит удар, докладывает о его результатах и следует на аэродром или в зону ожидания.

В подсистеме непосредственной авиационной поддержки используются следующие средства связи: узлы передачи данных AN/GSQ-119, узлы КВ- и УКВ-связи AN/MRC-107 (108); радиостанции тропосферной связи AN/TRC-97A, радиостанции AN/PRC-41 (47), узлы КВ-связи AN/TSC-60.

12.4. Объединенная тактическая система распределения информации

Составной частью системы «485-L» является объединенная тактическая система распределения информации (система связи) ДЖИТИДС. Система работает в диапазоне частот 962—1215 МГц. При передаче сообщений используются широкополосные сигналы. При уплотнении передаваемой информации от различных корреспондентов применяется временной метод. Максимальное количество возможных корреспондентов (каналов) в одной сети составляет 96705. Для передачи широкополосной информации может использоваться несколько каналов.

При использовании дополнительного кодового разделения сигналов в одном географическом районе в одной полосе частот может функционировать до 20 сетей.

Антенны, используемые большинством корреспондентов системы ДЖИТИДС, являются в основном ненаправленными. В некоторых наземных каналах связи могут использоваться направленные антенны.

Система ДЖИТИДС обеспечивает связь в пределах прямой видимости. Для увеличения дальности действия имеется возможность использовать самолетные ретрансляторы.

Аппаратурой ДЖИТИДС оснащаются самолеты дальнего радиолокационного обнаружения и управления Е-3А системы АВАКС, самолеты ТА, центры управления и оповещения ЦУО, командные пункты авиационных частей, передовые авианаводчики.

Важнейшим элементом системы ДЖИТИДС является адаптивное сопрягающее устройство ASIT. Оно обеспечивает сопряжение существующих разнотипных систем и способствует созданию единой системы связи для всех видов вооруженных сил на ТВД.

В системе ДЖИТИДС предусмотрена передача информации в интересах ведения РЭБ, которая позволяет координировать в реальном масштабе времени работу средств РЭБ, управлять их режимами, передавать полученные разведданные с боевых самолетов на командные пункты.

Система ДЖИТИДС обладает высокой оперативностью и повышенной помехозащищенностью.

Глава 13. РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ СРЕДСТВА САМОЛЕТОВ

13.1. Радиоэлектронные средства ударных самолетов

Опыт локальных войн во Вьетнаме и на Ближнем Востоке показывает, что, несмотря на бурное развитие ракет класса «земля — земля», важная роль в нанесении ударов по войскам и наземным объектам отводится авиации. Применительно к ВВС основных капиталистических государств это относится к стратегической и тактической авиации. Для нанесения ударов могут применяться ракеты класса «воздух — земля», авиационные бомбы.

Стратегическая авиация предназначена для нанесения ударов по объектам глубокого тыла (на удалении до 5—7 тыс. км), уничтожения наиболее важных объектов на ТВД и ведения воздушной разведки. На вооружении состоят самолеты-бомбардировщики В-52, В-1, ВВ-111А (США), «Вулкан» В.2 (Великобритания), «Мираж» IV (Франция) и самолеты стратегической разведки SR-71, U-2, С-135, «Вулкан» SR.2, «Канберра» PR.9.

Тяжелый стратегический бомбардировщик В-52 поступил на вооружение США в 1955 г., имеет экипаж 6 человек, 8 двигателей, дальность около 18 000 км (тактический радиус с грузом 4500 кг — 7100 км), взлетную массу 200 т, скорость 1000 км/ч, потолок до 17 км, максимальную бомбовую нагрузку 30 т (используются обычные и ядерные бомбы). Вооружен 1—4 пушками калибра 20 мм, вместо бомб могут быть подвешены 2 УР класса «воздух — земля» «Хаунд — Дог» или до 20 УР класса «воздух — земля» «Срэм» или крылатых ракет типа ALCM.

Самолет оснащен навигационно-бомбардировочной системой ASB-9 и системой управления огнем пушечной установки AN/ASG-21. Кроме того, самолет может нести средства радиоэлектронного подавления (РЭП): 4 ложные радиолокационные цели «Грин Квейл», до 14 передатчиков радиопомех, автомат сброса дипольных отражателей и др.

В состав навигационно-бомбардировочной системы входит панорамная РЛС обзора земной поверхности. С помощью этой РЛС осуществляются поиск и обнаружение наземных целей, прицельное бомбометание и пуск ракет, решаются навигационные задачи. РЛС излучает импульсные сигналы малой длительности, работает в режиме обзора в диапазоне длин волн 2—3 см.

На самолетах установлены связная и командная радиолинии, работающие соответственно в КВ- и УКВ-диапазоне, а также средства ближней («Такан») и дальней («Лоран», «Омега») радионавигации.

Тяжелый бомбардировщик В-1 имеет 4 двигателя, экипаж 4 человека, максимальную скорость полета 1,25 М, потолок выше 15 000 м, радиус действия около 6000 км, максимальную взлетную массу 217 т, максимальную бомбовую нагрузку 57 т. Вместо бомб на нем могут размещаться 38 УР «Срэм» или 22 крылатые ра-

кеты АЛСМ. Основные РЭС самолета: многофункциональная РЛС обзора передней полусферы AN/APQ-164, РЛС защиты задней полусферы AN/ALQ-153, аппаратура РЭБ AN/ALQ-161.

РЛС обзора передней полусферы обеспечивает полет в автоматизированном режиме на предельно малых высотах со следованием рельефу местности. Используется для решения задач навигации и управления оружием. На борту самолета устанавливаются также ложные радиолокационные и тепловые цели и средства сброса дипольных отражателей.

Средний бомбардировщик FB-111 имеет 2 двигателя, экипаж 2 человека, максимальную взлетную массу 45 т, скорость полета до 2330 км/ч, потолок до 18 км, максимальную дальность 6100 км, бомбовую нагрузку до 17 т, могут быть подвешены 6 УР «Срэм». Оснащен РЛС AN/APG-119 и другими РЭС.

Тактическая авиация предназначена для ведения на ТВД самостоятельных и совместно с сухопутными войсками боевых действий. Используется для решения задач: завоевания и удержания господства в воздухе, непосредственной поддержки сухопутных войск, изоляции района боевых действий, ведения воздушной разведки. Тактическая авиация оснащена самолетами F-4, F-15, F-16, F-111 (США), «Мираж» 2000, «Ягуар» (Франция), «Харриер» (Великобритания), «Торнадо» (ФРГ, Италия, Великобритания) и др.

Основные ТТД и РЭС многоцелевых самолетов тактической авиации, используемых в качестве истребителей-перехватчиков, рассмотрены в гл. 11. Здесь лишь остановимся на РЭС самолета F-111. Самолет имеет экипаж 2 человека, 2 двигателя, взлетную массу 39 т, максимальную скорость до 2655 км/ч, дальность полета до 6100 км, потолок до 18 км, бомбовую нагрузку 9 т. Самолет вооружен пушкой калибра 20 мм, могут быть подвешены обычные бомбы, противорадиолокационные УР «Шрайк», «Стандарт АРМ», HARM, ракеты общего назначения «Мейверик», «Булл-пап», управляемые авиационные бомбы «Уоллай-1», «Уоллай-2» и др. Самолет оснащен многофункциональной РЛС AN/APQ-113, РЛС слежения за рельефом местности AN/APQ-110, средствами радиосвязи (КВ- и УКВ-радиостанции), радионавигации и РЭП.

Наиболее важными РЭС ударных самолетов стратегической и тактической авиации являются многофункциональные РЛС, а самолета В-52 — панорамные РЛС обзора земной поверхности. РЛС позволяют вести поиск и обнаружение наземных объектов (целей), определять их координаты, решать задачи прицельного бомбометания, осуществлять пуск и наведение управляемых ракет. Эти РЛС являются импульсными, работают в диапазоне длин волн 2—3 см в режиме обзора земной поверхности при поиске целей и в режиме слежения — при прицеливании.

Имеющиеся на самолетах средства радиосвязи (КВ- и УКВ-радиостанции) и радионавигации (приемопередатчики) систем ближней навигации «Такан» и приемники дальней навигации «Лоран», «Омега» позволяют поддерживать радиосвязь с пунктом управ-

ления, решать задачи самолетовождения. Импульсная угломерно-дальномерная система «Такан» работает в дециметровом диапазоне волн, разностно-дальномерные гиперболические системы «Лоран» и «Омега», использующие импульсные и непрерывные сигналы, работают в диапазоне длинных и сверхдлинных волн.

13.2. Радиоэлектронные средства управляемых авиационных бомб и управляемых ракет класса «воздух — земля»

Для поражения наземных объектов применяются авиационные бомбы, ракеты класса «воздух — земля», стрелково-пушечное вооружение и др.

Авиационные бомбы (неуправляемые и управляемые) — одно из основных средств поражения наземных объектов. Неуправляемые бомбы обладают низкой точностью. Управляемые авиационные бомбы (УАБ) относятся, как и управляемые ракеты, к высокоточному оружию (ВТО). Специалисты НАТО рассматривают их в качестве одного из перспективных видов авиационного оружия.

На вооружении авиации США состоят планирующие УАБ «Уоллай-1» и «Уоллай-2». В «Уоллай-1» для наведения на цель используется телевизионная головка самонаведения (ТВГС). Обнаружив цель, летчик совмещает изображение цели с перекрестием на телевизионном экране, переключает систему наведения бомбы в режим автосопровождения цели и производит сброс бомбы. В дальнейшем ТВГС наводит бомбу на цель без участия летчика.

В УАБ «Уоллай-2» используется, кроме того, дополнительный канал связи «бомба — самолет». По этому каналу на телевизионном экране в кабине самолета отображается местность, которая попадает в поле зрения ТВГС бомбы. При этом в случае необходимости представляется возможность перенацелить бомбу на другую цель или изменить траекторию ее полета. Команды управления на УАБ передаются с помощью КРУ.

Наряду с УАБ с ТВГС применяются УАБ с лазерной головкой самонаведения (ЛГС), имеющие более высокую точность поражения. Для наведения УАБ с ЛГС необходимо обеспечить подсвет цели лучом лазера (с самолета, осуществляющего бомбометание или с самолета-корректировщика). Подсвет должен производиться в процессе всего полета бомбы к цели.

К основным средствам поражения наземных объектов относятся и управляемые ракеты (УР) класса «воздух — земля» — «Хаунд-Дог», «Срэм», «Кондор», «Мейверик», АЛСМ и др.

В УР «Хаунд-Дог» (дальность пуска 1000 км) и «Срэм» (дальность пуска 100—320 км) для наведения на цель используются инерциальные системы наведения.

УР «Кондор» (дальность пуска 65—80 км) имеет телевизионную командную систему наведения, УР «Мейверик» (дальность пуска 50 км) — телевизионные, тепловые и лазерные головки самонаведения.

Крылатые ракеты АLCM могут следовать к объекту поражения на низких высотах с огибанием рельефа местности и с изменением высоты полета по программе. Для наведения крылатых ракет применяется комбинированная система управления — инерциальная и корреляционная. Последняя представляет собой совокупность радиовысотомера и ЭВМ, в память которой перед пуском ракеты вводится программа полета. Радиовысотомер производит измерение текущих высот рельефа местности. Сравнивая полученные данные с эталонными, ЭВМ определяет истинное местоположение ракеты и вводит необходимые поправки в инерциальную систему управления.

Для уничтожения наземных РЛС систем управления ПВО используются противорадиолокационные ракеты с пассивными радиолокационными головками самонаведения (РГС) типа «Шрайк», «Стандарт АРМ», HARM с дальностями пуска соответственно 17, 50 и 100 км. Выбор РЛС для поражения обеспечивается системами радиотехнической разведки AN/ALR-45, -46, -50, -67, установленными на ударных самолетах.

13.3. Средства радиоэлектронной разведки самолетов

Основными носителями средств воздушной разведки, в том числе и РЭС, являются пилотируемые самолеты-разведчики и беспилотные летательные аппараты.

Для ведения разведки днем и ночью в любых метеоусловиях, а также для обнаружения замаскированных от наблюдения наземных объектов создаются разведывательные комплексы с техническими средствами, функционирование которых основано на различных физических принципах. В состав комплексов разведывательного оборудования самолетов воздушной разведки, имеющих на вооружении войск ВВС стран НАТО (SR-71, KC-135, RF-4C, RF-5E — США, «Вулкан» SR.2, «Ягуар» GR.1, «Канберра» PR.7 и PR.9 — Великобритания, «Мираж» IVA, «Мираж» 3RD — Франция), входят аэрофотоаппараты, средства тепловой (в ИК-диапазоне), телевизионной, радиолокационной, лазерной, радио- и радиотехнической разведки.

Пассивные ИК-средства (например, ИК-станция переднего обзора AN/AAD-5) позволяют обнаруживать и опознавать различные наземные объекты по их тепловому контрасту на фоне естественных электромагнитных излучений поверхности Земли путем сканирования по местности перпендикулярно курсу аппарата. Изображение местности и объектов может воспроизводиться на экране ЭЛТ, фиксироваться на фотопленке или магнитной ленте. После преобразования в цифровую форму возможна передача изображения по радиоканалам на наземные пункты. Диапазон электромагнитных волн, в котором работает большинство этих средств, — 8—14 мкм. Их температурная чувствительность — 0,5—0,1°С; высота применения — 60—3000 м. При применении ИК-средств воз-

можно обнаружение объектов, замаскированных и укрытых от визуального наблюдения и фотографирования.

Изображение местности и объектов, получаемое при ведении телевизионной разведки, отображается на бортовом индикаторе и может одновременно передаваться на наземные пункты сбора и обработки информации. Дальность устойчивой передачи информации — примерно 50 км. Качество телевизионных изображений зависит от прозрачности атмосферы и метеоусловий. Телевизионная разведка осуществляется с помощью телевизионных систем. В их состав входят самолетная передающая и наземная приемная станции.

Всепогодность и большая глубина воздушной разведки обеспечиваются при применении средств радиолокационной разведки, прежде всего РЛС бокового обзора (РЛС БО). Устанавливаемые на самолетах-разведчиках РЛС БО (например, типа AN/APQ-102) позволяют вести обзор и получать радиолокационную карту местности на дальностях 8—80 км (в зависимости от высоты полета) в обе стороны от линии пути самолета. РЛС БО имеют высокую разрешающую способность (10—30 м) по дальности и азимуту. Поэтому с их помощью можно получать изображение местности высокого качества.

Все более широкое применение получают лазерные системы разведки. Существенным достоинством этих средств разведки является высокая разрешающая способность, сравнимая с разрешающей способностью аэрофотоаппаратов.

В комплекс средств радиоэлектронной разведки самолетов-разведчиков входят станции радио- и радиотехнической разведки. С помощью этих средств получают наиболее достоверные данные о РЭС: их местоположении, назначении, типе, параметрах излучаемых сигналов и др.

13.4. Средства радиоэлектронной борьбы самолетов

Средства радиоэлектронной борьбы (РЭБ), устанавливаемые на самолетах стратегической и тактической авиации стран — участниц НАТО, подразделяют на средства индивидуальной защиты и средства групповой защиты (индивидуальные и групповые средства РЭБ).

Индивидуальные средства РЭБ имеют все самолеты. В состав комплекса этих средств входят: обнаружительные приемники, автоматические станции активных помех, устройство сброса противорадиолокационных отражателей (ПРЛО) и ИК-ловушек.

Обнаружительные приемники (например, типа AN/APR-36, -37, -38 и AN/ALR-46, -69) предназначены для предупреждения летчика об облучении его самолета радиолокационными средствами противника (РЛС обнаружения и автоматического сопровождения, наведения УР класса «земля — воздух» или «воздух — воздух»). Информация, получаемая с помощью этих приемников, дает воз-

возможность экипажу произвести противозенитный маневр или применить средства радиоэлектронного подавления.

Станции активных помех и устройства создания пассивных помех служат для радиоэлектронного подавления РЭС управления оружием и тем самым снижают эффективности его применения.

Приведем в качестве примера данные некоторых станций активных помех. Станция радиопомех AN/ALQ-119 имеет три передатчика активных радиопомех на ЛБВ, работающих одновременно в непрерывном и импульсном режимах в диапазонах частот 2—4, 4—8, 8—10 ГГц. Она может создавать маскирующие (шумовые) и имитирующие помеховые сигналы. Спектральная плотность мощности шумовых сигналов — 20—30 Вт/МГц. Предусматривается применение этой станции как для подавления импульсных РЛС, так и РЛС с непрерывным и квазинепрерывным излучением.

В состав аппаратуры входит цифровая мини-ЭВМ. Как считают американские специалисты, с помощью ЭВМ представляется возможность управления мощностью, частотой и видом модуляции помеховых сигналов. Изменение параметров помехового сигнала осуществляется в результате анализа сигналов подавляемого РЭС, принимаемых станцией AN/ALQ-119.

Более совершенной является станция радиопомех AN/ALQ-131. В ее состав могут входить от одного до пяти генераторов помех. Предусмотрено 40 вариантов различных видов модуляции помеховых сигналов. Станция может применяться для создания маскирующих (шумовых) и имитирующих (ответных) помех.

Выбор вида радиопомех, параметров модуляции помеховых сигналов и законов изменения их задержки во времени относительно принятого сигнала подавляемого РЭС производится автоматически с помощью ЭВМ. Последняя объединена с разведывательным приемником станции, работающего в режиме последовательного обзора несущих частот. Для оценки летчиком общей радиоэлектронной обстановки на маршруте полета и контроля эффективности создания радиопомех в приемнике предусмотрен режим быстрого просмотра всего диапазона несущих частот подавляемых РЭС. В этом режиме станция работает в периоды времени, когда передатчик автоматически прекращает излучение помехового сигнала.

Для защиты самолета от ракет классов «земля — воздух» и «воздух — воздух» с ТГС используются станции активных помех ИК-диапазона, например AN/ALQ-132. Источником ИК-излучения является специальная нагреваемая мембрана. Нагрев мембраны осуществляется за счет сгорания авиационного топлива. ИК-излучение мембраны модулируется специальным сменным модулятором (обтюратором). Включение станции производится от разведприемника типа AN/ALR-23, с помощью которого осуществляется обнаружение момента пуска ракет.

Для создания пассивных помех РЭС управления оружием используются устройства сброса ПРЛО (типа AN/ALE-40) и ИК-ловушек (типа TBC-72).

Устройство AN/ALE-40 — пиротехнического типа, имеет модульную конструкцию и включает 480 патронов, размещенных в 16 кассетах. Емкость каждой кассеты — 30 патронов с дипольными отражателями либо 30 ИК-патронов.

Устройство выброса TBC-72 содержит 4 кассеты, подвешиваемых попарно. Каждая из них может быть использована также для сброса дипольных отражателей и ИК-патронов. Емкость одной кассеты — 18 патронов любого типа. В каждом патроне находятся дипольные отражатели разных размеров, что обеспечивает маскировку целей в широком диапазоне частот.

Групповые средства РЭБ устанавливаются на самолетах РЭБ (ЕВ-66, ЕС-135, ЕФ-111А, ЕФ-4 и др.). Как следует из материалов зарубежной печати, наиболее совершенным самолетом РЭБ является американский самолет ЕФ-111А, оснащенный комплексом для создания активных радиопомех AN/ALQ-99. В состав комплекса входят приемник для обнаружения и определения параметров сигналов подавляемых РЛС, 10 передатчиков помех и аппаратура обработки и хранения данных. Управление работой комплекса осуществляется на основании анализа сигналов подавляемых РЭС. Комплекс может работать в трех режимах: автоматическом (обнаружение и опознавание сигналов РЭС, выбор объектов радиоэлектронного подавления и режимов работы передатчиков помех осуществляются без участия оператора), полуавтоматическом (РЭС как объект подавления выбирает оператор) и ручном (оценку радиоэлектронной обстановки и определение режимов работы передатчиков производит оператор).

Прикрытие помехами самолетов ударных групп может обеспечиваться при действиях самолетов РЭБ в зонах барражирования или в составе этих групп.

Одним из направлений дальнейшего совершенствования средств и способов РЭБ, как следует из материалов зарубежной печати, является комплексное использование средств радио- и радиотехнической разведки, средств автоматизации управления и средств огневого поражения объектов. Реализация этого направления — разработка и оснащение войск разведывательно-ударными комплексами типа PLSS (США), предназначенными для борьбы с наземными РЭС, и прежде всего с РЛС ПВО.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

by Mr.Sam 11.03.2008

Империалистические круги стран НАТО, стремясь к военному превосходству над Советским Союзом, уделяют большое внимание дальнейшему развитию ПВО и ВВС, оснащению их новейшей военной техникой и разнообразным оружием, модернизации образцов, состоящих на вооружении, совершенствованию систем управления и РЭС, входящих в их состав.

По расчетам экспертов НАТО, повышение эффективности ПВО, в частности на ЦЕ ТВД, возможно за счет развертывания воздушной системы дальнего радиолокационного обнаружения и управления, замены устаревших ЗРК новыми ЗРК «Пэтриот», увеличения количества всепогодных истребителей-перехватчиков (типа F-15, F-16 и «Торнадо») и улучшения объектовой ПВО путем использования современных ЗРК ближнего боя. В соответствии с планами развития ПВО на ТВД предполагается совершенствование системы управления активными средствами ПВО. Для этого радиолокационные посты, пункты и центры управления оснащаются новыми РЛС, проводится модернизация линий связи между звеньями систем управления. В центрах управления устанавливается дополнительное оборудование для сопряженной работы с воздушной системой ДРЛО и управления АВАКС.

Прикрытие войск от ударов с воздуха на предельно малых, малых и средних высотах предусматривается с использованием сил и средств войсковой ПВО. При этом совершенствование войсковой ПВО предполагается за счет разработки и модернизации состоящих на вооружении зенитных ракетных и артиллерийских систем, способных вести огонь одновременно по нескольким воздушным целям. К числу перспективных направлений повышения эффективности ведения стрельбы ЗА зарубежные специалисты относят создание снарядов с устройствами управления, позволяющими корректировать траектории полета снарядов.

Как отмечает иностранная печать, в 80-е гг. существенно обновился самолетный парк ВВС НАТО. На вооружение поступили многоцелевые самолеты F-15, F-16 и «Торнадо». Применение этих самолетов дает возможность решать комплекс задач по уничтожению авиации в воздухе, поражению наземных целей, оказанию авиационной поддержки сухопутным войскам, ведению воздушной разведки. Указанные истребители оснащены многофункциональными импульсно-доплеровскими РЛС, позволяющими обнаруживать и сопровождать воздушные цели на больших дальностях, осу-

ществлять поиск наземных целей и определять дальность до них, обеспечивать полет в режиме огибания рельефа местности.

На вооружение ВВС США поступают сверхзвуковые стратегические бомбардировщики B-1B, новые партии крылатых ракет воздушного базирования AGM-86, современные системы высокоточного оружия (УАБ и УР классов «воздух — воздух», «воздух — поверхность», противорадиолокационные УР). Как сообщает иностранная печать, эффективность их применения резко возрастает при объединении в единый комплекс средств разведки и целеуказания, оружия, средств управления и связи. Указанные комплексы получили название разведывательно-ударных комплексов (РУК). В настоящее время американскими специалистами разрабатываются два типа РУК: PLSS и «Ассолт-Брейкер». PLSS предназначен для разведки и массового уничтожения РЛС ПВО противника в полосе шириной и глубиной до 500 км. В дальнейшем предполагается применение этого комплекса для уничтожения других РЭС (радиостанций, станций активных помех) и неизлучающих целей, вскрытых разведкой. «Ассолт-Брейкер» предназначен для уничтожения бронированных целей в глубине территории противника. В качестве долгосрочных направлений в развитии систем высокоточного оружия рассматривается объединение систем оружия со средствами разведки, в том числе космической, совместное использование комплексов оружия и перспективных АСУ войсками.

Развитие и совершенствование РЭС, входящих в состав систем управления ПВО и ВВС, осуществляется в направлении увеличения дальности действия, повышения точности, разрешающей и пропускной способности, повышения помехозащищенности и надежности.

Краткое рассмотрение только некоторых направлений развития ПВО и ВВС свидетельствует об агрессивных устремлениях военно-политического руководства стран НАТО. В этих условиях укрепление обороноспособности нашего государства является важнейшей задачей КПСС и всего советского народа.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Болдин В. А., Богачев А. С., Ярлыков М. С. Авиационные радионавигационные устройства и системы. ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, 1980.
2. Вакин С. А., Шустов Л. Н. Радиопротиводействие и радиотехническая разведка. М., Сов. радио, 1968.
3. Величкин А. И., Саютин Ю. В. Средства связи и организация их боевого применения. ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, 1976.
4. Гоноровский И. С. Радиотехнические цепи и сигналы. М., Сов. радио, 1977.
5. Демидов В. П., Кутыев Н. Ш. Аппаратура управления полетом ЗУР. М., Воениздат, 1978.
6. Дудник П. И. Авиационные радиолокационные устройства. ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, 1976.
7. Защита от радиопомех. Под ред. М. В. Максимова. М., Сов. радио, 1976.
8. Краткий словарь по радиоэлектронике. Под ред. Г. П. Попова и В. Г. Григорьянца. М., Воениздат, 1980.
9. Лазеры в авиации. Под ред. В. М. Сидорина. М., Воениздат, 1982.
10. Мальгин А. С. Управление огнем зенитных ракетных комплексов. М., Воениздат, 1976.
11. Материалы журнала «Зарубежное военное обозрение». М., Воениздат, 1974—1985.
12. Максимов М. В., Горгонов Г. И. Радиоэлектронные системы самонаведения. М., Радио и связь, 1982.
13. Максимов М. В., Горгонов Г. И., Чернов В. С. Авиационные системы радиоуправления. ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, 1984.
14. Мельник Ю. А., Стогов Г. В. Основы радиотехники и радиотехнические устройства. М., Сов. радио, 1973.
15. Молочков Ю. Б. Антенно-фидерные устройства. ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, 1983.
16. Справочник офицера противовоздушной обороны. Под ред. Г. В. Зимины. М., Воениздат, 1981.
17. Справочник по связи и радиотехническому обеспечению полетов. Под ред. Р. С. Терского. М., Воениздат, 1979.
18. Справочник по радиоэлектронным системам. Под ред. Б. Х. Кривицкого. М., Энергия, 1978, тт. 1—2.
19. Справочник по радиолокации. Под ред. М. Скольника. Пер. с англ. М., Сов. радио, 1976—1979, тт. 1—4.
20. Суриков Б. Т. Боевое применение ракет Сухопутных войск. М., Воениздат, 1979.
21. Теоретические основы радиолокации. Под ред. Я. Д. Ширмана. М., Сов. радио, 1970.
22. Тихонов В. И. Статистическая радиотехника. М., Сов. радио, 1966.
23. ГОСТ 24375—80. Радиосвязь. Термины и определения.

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
Предисловие	3
Введение	4
Раздел I. Принципы построения и функционирования радиоэлектронных средств	6
Глава 1. Получение и передача информации	—
1.1. Радиоэлектронные средства получения и передачи информации. Радиосигнал — переносчик информации	—
1.2. Классификация радиосигналов	10
1.3. Математические методы описания детерминированных сигналов	11
1.4. Математические методы описания случайных процессов	14
Глава 2. Передающие устройства	15
2.1. Основные параметры передающих устройств	—
2.2. Основные структурные схемы передатчиков	17
2.3. Управление колебаниями в передающих устройствах	21
Глава 3. Излучение и распространение электромагнитных волн	26
3.1. Основные свойства электромагнитных волн	—
3.2. Характеристика сред распространения ЭМВ	29
3.3. Особенности распространения электромагнитных волн различных диапазонов	30
Глава 4. Антенно-фидерные устройства	32
4.1. Линии передачи электромагнитных колебаний	—
4.2. Классификация, основные характеристики антенн	34
4.3. Основные типы антенн	37
Глава 5. Приемные устройства	42
5.1. Основные параметры приемных устройств	—
5.2. Основные структурные схемы приемников	44
5.3. Преобразование частоты	47
5.4. Детектирование радиосигналов	48
5.5. Автоматические регулировки приемников	55
Глава 6. Радиолокационные средства	56
А. Принципы получения радиолокационной информации	—
6.1. Принципы радиолокации объектов	—
6.2. Основные характеристики радиолокационных целей	58
6.3. Методы определения координат и параметров движения объектов	61
6.4. Основные тактико-технические данные РЛС	70
6.5. Максимальная дальность действия РЛС	74
Б. Радиолокационное обнаружение объектов	75
6.6. Характеристики обнаружения радиолокационных сигналов	—
6.7. Структурные схемы приемников РЛС	78

	Стр.
6.8. Принцип функционирования импульсной некогерентной РЛС обнаружения	80
6.9. Принцип функционирования импульсной когерентной РЛС обнаружения	86
В. Автоматическое сопровождение лоцируемых объектов	91
6.10. Автоматическое сопровождение целей по дальности	—
6.11. Автоматическое сопровождение целей по направлению	94
6.12. Автоматическое сопровождение целей по скорости	103
6.13. Принципы функционирования РЛС автоматического сопровождения целей	106
Глава 7. Радионавигационные средства	115
7.1. Решаемые задачи и классификация радионавигационных средств	—
7.2. Принципы построения радионавигационных измерителей	120
Глава 8. Радиоэлектронные средства связи и управления	128
8.1. Классификация РЭС связи и управления	—
8.2. Требования, предъявляемые к системам радиосвязи	131
8.3. Способы организации радиосвязи	133
8.4. Авиационные радиостанции	134
8.5. Многоканальные системы радиосвязи	136
8.6. Командные радиолинии управления	139
Раздел II. Радиоэлектронные средства систем управления ПВО и ВВС	142
Глава 9. Автоматизированные системы управления	—
9.1. Организация системы ПВО	—
9.2. Система управления силами и средствами ПВО НАТО в Европе	145
Глава 10. Радиоэлектронные средства систем управления войсками ПВО	149
10.1. Радиолокационные средства и системы обнаружения воздушных целей	—
10.2. Радиоэлектронные средства связи и передачи данных	160
Глава 11. Радиоэлектронные средства систем управления оружием ПВО	161
11.1. Радиоэлектронные средства систем управления ракетами и самолетами стран НАТО	—
11.2. Радиоэлектронные средства зенитных ракетных комплексов	180
11.3. Радиоэлектронные средства ЗСК	192
11.4. Радиоэлектронные средства истребителей-перехватчиков	193
Глава 12. Системы управления ВВС	199
12.1. Организационная структура автоматизированной системы управления тактической авиации	—
12.2. Подсистема управления ТА	201
12.3. Подсистема непосредственной авиационной поддержки	202
12.4. Объединенная тактическая система распределения информации	204
Глава 13. Радиоэлектронные средства самолетов	205
13.1. Радиоэлектронные средства ударных самолетов	—
13.2. Радиоэлектронные средства управляемых авиационных бомб и управляемых ракет класса «воздух—земля»	207
13.3. Средства радиоэлектронной разведки самолетов	208
13.4. Средства радиоэлектронной борьбы самолетов	209
Заключение	212
Список использованной литературы	214